

**МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ М.В.ЛОМОНОСОВА**

**МЕЖДУНАРОДНЫЙ УЧЕБНО-НАУЧНЫЙ
БИОТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ЦЕНТР**



**Труды
Всероссийской научной конференции
«Научные результаты ученых Московского
университета, связанные с развитием
биотехнологии и других междисциплинарных
исследований»**

*Москва
29 марта 2024 г.*

**Москва
2024**

Составители:

Кривошей А.В. – ассистент МБЦ МГУ

Черныш В.В. – инженер-лаборант 1 категории МБЦ МГУ

Сборник трудов Всероссийской научной конференции «Научные результаты ученых Московского университета, связанные с развитием биотехнологии и других междисциплинарных исследований» (29 марта 2024 г.), посвященной 270-летию МГУ имени М.В.Ломоносова и 220-летию Московского общества испытателей природы. – Москва, 2024. – 87 с.

В сборник вошли материалы докладов и тезисы публикаций по итогам научной конференции.

Труды представлены в авторской редакции.

© Коллектив авторов, 2024
© Кривошей А.В., Черныш В.В., сост., 2024

Оглавление

Бабыкин М.М., Обандо С.Т.А., Зинченко В.В. Гены утилизации ксеносидерофоров у цианобактерии <i>Synechocystis</i> sp. PCC 6803	4
Кравцова Т.Р., Толстикова А.В., Белевич Т.А. Идентификация микроорганизмов, выделенных из микробиоты Белого моря	21
Кривошей А.В., Панова В.В., Ефремов А.А., Гольден А.И., Вржеш П.В. Регуляция уровня простагландинов в человеческом организме с помощью нестероидных противовоспалительных препаратов	24
Новиков К.Н., Остроумов С.А. Новые факты о биомембранах и их включение в разрабатываемую программу лекционного курса "Введение в науку о биомембранах"	33
Остроумов С.А., Матишов Г.Г., Жиров В.К., Ивантер Э.В., Криксунов Е.А., Розенберг Г.С., Садчиков А.П. Учение В.И. Вернадского о биосфере и его роль для фундаментальной биологии и биотехнологии	42
Остроумов С.А., Цай С. Биотестирование мембранотропных экотоксикантов	50
Садчиков А.П. Ботанический сад президента МОИП	57
Садчиков А.П. Первые метеорологические наблюдения в Москве	63
Садчиков А.П., Герасимова Т.Н. Пресноводные водоемы: причины загрязнения и пути оздоровления	68
Садчиков А.П., Герасимова Т.Н., Полякова Т.В., Остроумов С.А. Биосферная роль планктонных фильтраторов в водоемах	73
Садчиков А.П., Козлов О.В., Остроумов С.А., Капков В.И. Вклад Московского общества испытателей природы в развитие научной и преподавательской деятельности в МГУ	83

Гены утилизации ксеносидерофоров у цианобактерии *Synechocystis* sp. PCC 6803

Бабыкин М.М.¹, Обандо С.Т.А.², Зинченко В.В.²

¹ Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова,
Международный учебно-научный биотехнологический центр, г. Москва, Россия

² Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова,
биологический факультет, г. Москва, Россия

Соответствует по содержанию пленарному докладу Бабыкина М.М. на научной конференции МБЦ МГУ имени М.В.Ломоносова (29 марта 2024 года), посвященной 270-летию Московского университета (1755-2025)

Популяризация собственных научных данных, опубликованных ранее [5; 34], а также отраженных в диссертации и автореферате на соискание ученой степени кандидата биологических наук Обандо С.Т.А. (МГУ, Москва-2019)
[URL в конце списка литературы]

Список использованных сокращений

АТФ	– аденозинтрифосфат
ПЦР	– полимеразная цепная реакция
тпн	– тысяча пар нуклеотидов
FCH	– феррихром
Fe(II)	– двухвалентное, закисное (<i>ферро</i>), железо
Fe(III)	– трехвалентное, окисное (<i>ферри</i>), железо
Fe-сидерофор	– ферри-сидерофор, или сидерофор в комплексе с Fe(III)
FeAB	– Fe-аэробактин
FeSK	– Fe-шизокинин
FOB	– ферриоксамин В
Gm ^(r)	– гентамицин ^(резистентность)
Km ^(r)	– канамицин ^(резистентность)
OD ₇₅₀	– оптическая плотность при 750 нм
PBP(s)	– периплазматический(е) (субстрат-)связывающий(е) белок(ки)
SAV	– сидерофор <i>A. variabilis</i>
SK	– шизокинин
Sp ^(r)	– спектиномицин ^(резистентность)
TBBDT(s)	– TonB-зависимый(е) транспортер(ы)
WT	– дикий тип

Аннотация

Для эффективного поглощения жизненно важного микроэлемента, железа, в его труднорастворимой окисленной форме Fe(III), преобладающей в кислородсодержащих водных средах, многие бактерии синтезируют высоко аффинные хелаторы Fe(III), сидерофоры. Одноклеточная цианобактерия *Synechocystis* sp. PCC 6803 (далее *Synechocystis*), широко известный модельный объект изучения оксигенного фотосинтеза, не синтезирует собственные сидерофоры, однако ее геном кодирует все предполагаемые компоненты опосредованного сидерофорами пути транспорта Fe(III). Экспериментальные свидетельства существования такого пути у *Synechocystis* до сих пор отсутствовали, однако путь восстановительного поглощения железа, включающий высвобождение Fe(III) из комплексов, в том числе из Fe-сидерофоров, в растворимой восстановленной форме Fe(II), был детально изучен. Нами впервые показано, что *Synechocystis* способна использовать в качестве единственных источников железа для роста чужеродные (ксено-) сидерофоры, а именно дигидроксаматные ксеносидерофоры, Fe-шизокинин (FeSK) либо сидерофор нитчатой цианобактерии *Anabaena variabilis* ATCC 29413 (SAV). С помощью направленного мутагенеза мы инактивировали 14 генов *Synechocystis*, кодирующих потенциальные компоненты характерных для грамотрицательных бактерий систем транспорта Fe-сидерофоров. В результате нами выявлено 8 генов, функционально вовлеченных в прямой перенос FeSK или SAV из среды через две мембраны в цитоплазму клетки. Вместе с тем инактивация генов *feoB* или *futB* и *futC*, кодирующих соответственно компоненты основных транспортеров свободных ионов Fe(II) или Fe(III) через внутреннюю мембрану, не нарушала способность *Synechocystis* утилизировать FeSK или SAV в качестве единственных источников железа. Таким образом, нами экспериментально доказано, что не продуцирующая собственные сидерофоры цианобактерия *Synechocystis* может легко поглощать определенные ксеносидерофоры классическим для грамотрицательных бактерий прямым путем транспорта без восстановления Fe(III) в периплазме.

Введение

Цианобактерии относятся к числу древнейших организмов; их ископаемым останкам около 3,5 миллиардов лет [39]. Вероятно, они были первыми обладателями оксигенного фотосинтеза и сыграли центральную роль в накоплении кислорода в земной атмосфере, что кардинально повлияло на эволюцию жизни. Как полагает теория эндосимбиоза, хлоропласты растений произошли от древних цианобактерий, чем и объясняется большое сходство систем фотосинтеза у их современных представителей. В настоящее время цианобактерии обитают в разнообразных экологических нишах от почвы и пресных вод до океанов и служат одними из основных первичных продуцентов биосферы. Более того, они первыми колонизируют засушливые территории, и многие виды фиксируют молекулярный азот [13]. Установлено, что вклад цианобактерий в общую продуктивность биосферы достигает 25% [10; 14], а в фиксацию атмосферного азота в морях и океанах – 50% [21; 22].

Железо, благодаря его важной каталитической роли в различных биохимических функциях клетки, является незаменимым микроэлементом для преобладающей части бактерий [3]. Однако в сравнении с гетеротрофными бактериями, например, с *Escherichia coli*, цианобактерии имеют на порядок более высокую потребность в железе для поддержания богатых этим микроэлементом фотосистем [4; 23].

В содержащей кислород водной среде железо находится преимущественно в окисленной форме Fe(III) [7; 8], образующей труднорастворимые соединения с чрезвычайно низкой биодоступностью [12; 15], что является основным фактором ограничения роста цианобактерий в местах их обитания [6; 29; 48]. Поэтому обладание эффективными механизмами усвоения железа жизненно важно для цианобактерий [46]. Один из таких механизмов, выявленный у различных бактерий и грибов, включает в себя синтез, секрецию и возвратный транспорт в цитоплазму небольших органических молекул, сидерофоров, обладающих чрезвычайно сильным сродством к Fe(III) [32; 45]. Выделяемые в среду десферри-сидерофоры растворяют и связывают Fe(III), а затем в форме Fe-сидерофоров активно поглощаются клеткой. Данный механизм прямого переноса Fe-сидерофоров в цитоплазму хорошо изучен у гетеротрофных бактерий [11; 35].

Давно показано, что цианобактерии способны синтезировать и утилизировать собственные сидерофоры, и эта их способность по-прежнему активно исследуется [27; 49]. Однако до сих пор их единственным представителем с экспериментально выявленными системами биосинтеза и секреции дигидроксаматного сидерофора шизокинина (SK), а также его утилизации в форме Fe-шизокинина (FeSK), остается нитчатая азотфиксирующая цианобактерия *Anabaena* sp. PCC 7120 (далее *Anabaena* 7120) [41; 36; 37].

Объект нашего исследования, одноклеточная цианобактерия *Synechocystis*, активно используется в качестве модельного организма для изучения не только оксигенного фотосинтеза, но и систем поглощения железа у цианобактерий. Поскольку *Synechocystis* лишена генов биосинтеза и секреции сидерофоров, и ее неспособность продуцировать сидерофоры доказана экспериментально, сложилось общее императивное представление о приоритетной стратегии утилизации железа, и свободного и органически связанного, у цианобактерий за счет восстановления Fe(III) в периплазме. Однако кодирование геномом *Synechocystis* всех потенциальных компонентов прямого импорта Fe-сидерофоров предполагало существование у нее классического сидерофор-опосредованного пути поглощения железа. С целью проверки этого предположения в нашей работе были поставлены две задачи: (1) выявить ксеносидерофоры, представляющие эффективные источники железа для *Synechocystis*, и (2) идентифицировать существенные для их утилизации гены *Synechocystis*.

Материалы и методы

В работе использовали штамм дикого типа (WT; «Московский вариант») *Synechocystis* и мутанты, сконструированные нами на его основе, а также штамм WT нитчатой цианобактерии *Anabaena variabilis* ATCC 29413 (далее *A. variabilis*) в роли продуцента ксеносидерофора SAV [44]. Цианобактерии выращивали при 30°C фотоавтотрофно (при постоянном освещении без экзогенного источника углерода) либо на плотной (содержащей 0,9% агара) либо в жидкой минеральной среде YBG11 [38]. В качестве промежуточного хозяина рекомбинантных ДНК-конструкций, содержащих мутантные производные целевых генов *Synechocystis*, использовали штамм *Escherichia coli* NM522 (далее *E. coli*) [18]. Клетки *E. coli* культивировали при 37°C в течение 18 ч либо в жидкой, либо на плотной (1,5% агара) богатой среде LB [1] с добавлением определенного антибиотика, гентамицина (Gm), канамицина (Km) или спектиномицина (Sp), в качестве селективного агента с целью изолирования и сохранения нужного рекомбинантного клона. Все бактериальные штаммы, включая мутантные, полученные нами, сохраняли в коллекции кафедры генетики биологического факультета МГУ имени М.В.Ломоносова.

В роли наиболее вероятных эффективных источников железа для *Synechocystis* тестировали 5 гидроксаматных Fe-сидерофоров, 4 из которых являлись продуктами биотехнологических компаний: ферриоксамин В (FOB) – Sigma-Aldrich; феррихром (FCH), ферриаэробактин (FeAB) и FeSK – EMC Microcollections GmbH (Рисунок 1). Пятый по счету дигидроксаматный сидерофор SAV с неизвестной доподлинно структурой [44] применяли в

виде стерильного фильтрата культуры *A. variabilis*, выращенной в условиях голодания по железу. Все перечисленные ксеносидерофоры использовали в концентрации 10 мкМ в среде без стандартного неорганического источника железа, соли FeCl₃ (YBG11-Fe).

Далее, очень сжато, описаны общая стратегия и базовые молекулярно-генетические и физиолого-биохимические методы данного исследования. Поиск генов, потенциально вовлеченных в контроль импорта ксеносидерофоров у *Synechocystis*, осуществляли с помощью рутинного биоинформатического анализа ее генома. Найденные гены представляли мишень функционального анализа, подразумевающего их направленную инактивацию и последующее изучение фенотипа соответствующих мутантов *Synechocystis*.

Стандартный функциональный анализ гена включал в себя следующие этапы.

(1) ПЦР-амплификация участка геномной ДНК с геном-мишенью штамма WT *Synechocystis*.

(2) Клонирование гена в векторной плазмиде с отбором рекомбинантной плазмиды в *E. coli*.

(3) Инактивация гена в рекомбинантной плазмиде за счет делеции и замещения гена или его части «кассетой устойчивости» (содержит ген устойчивости) к определенному антибиотику.

(4) Получение «гетерозиготного» мутанта *Synechocystis* с инактивированным геном-мишенью с помощью трансформации рекомбинантной плазмидой (либо непосредственно рекомбинантным ПЦР-фрагментом, синтезированным *in vitro*; см. следующий абзац) клеток штамма WT с рекомбинационным замещением в геноме *Synechocystis* гена-мишени WT его мутантной плазмидной копией.

(5) Отбор (сегрегация) «гомозиготного» мутанта *Synechocystis* в процессе последовательных пересевов отдельных колоний на плотной среде с повышающейся концентрацией селективного антибиотика, устойчивость к которому детерминирует ген-маркер в составе инактивированной копии гена-мишени. Подтверждение гомозиготного статуса мутанта соответствующими данными ПЦР-анализа.

(6) Сравнительное изучение характера роста отобранного мутанта и штамма WT в присутствии ксеносидерофора, эффективного источника железа в среде YBG11-Fe. Если в данных условиях рост мутанта был нарушен, то следовал вывод о существенной роли инактивированного гена в контроле утилизации ксеносидерофора клетками *Synechocystis*.

Вместе с тем в данной работе подавляющее большинство мутантов *Synechocystis* было сконструировано с применением эффективной унифицированной стратегии, основанной на модифицированном нами подходе Nikawa, Kawabata, 1998 [33]. Ключевая особенность этой стратегии заключается в сопряжении ПЦР с лигированием и «расширением перекрывания»

фрагментов ДНК. Как видно из Рисунка 2, с ее помощью можно синтезировать рекомбинантную ДНК с инактивированным геном в серии ПЦР без трудоемкого молекулярного клонирования *in vivo*. В дополнение к вышесказанному следует также отметить важную особенность *Synechocystis* как объекта генетики. В отличие от «модельной» *E. coli*, гаплоидной в стационарной фазе роста, клетка *Synechocystis* высоко полиплоидна: до 60 копий хромосомы (генома) в стационарной фазе и более 200 – в логарифмической [19]. Поэтому сохранение хотя бы одной копии гена WT у мутанта *Synechocystis* является залогом его генетической нестабильности и делает его малопривлекательным для дальнейшего изучения. Однако в наше время вопрос «гомозиготного статуса» мутанта *Synechocystis* легко и надежно решается с помощью высокочувствительного метода ПЦР (примеры на Рисунке 4).

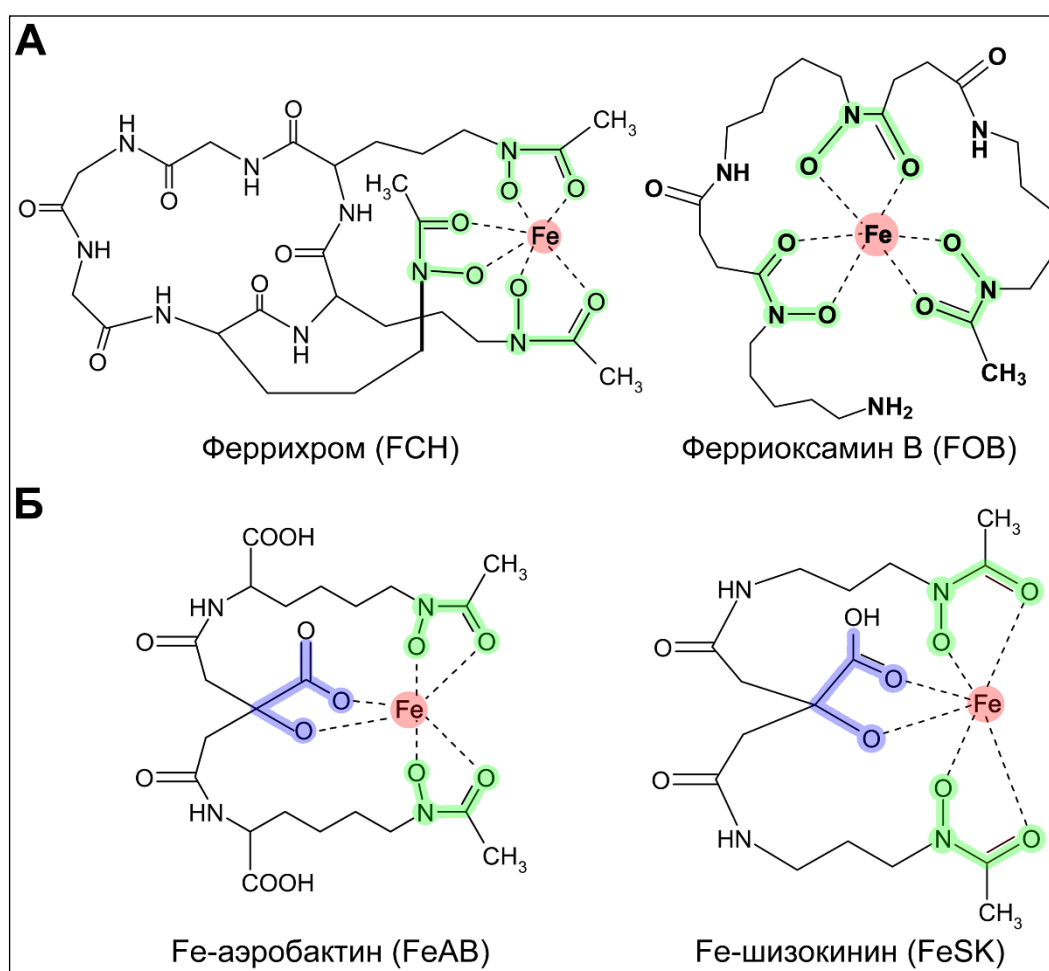


Рис. 1. Используемые Fe-сидерофоры с полностью установленной структурой: (А) тригидроksamатные и (Б) дигидроksamатные (карбоксилат-гидроksamатные). Цветом выделены химические группы, участвующие в образовании гексадентатного комплекса сидерофора с Fe(III), зеленым – гидроksamатные, синим – карбоксилатные. Иллюстрации (с небольшой модификацией) и их источники: FOB из обзора [16]; FCH, FeAB и FeSK из каталога EMC Microcollections GmbH (2018/2019).

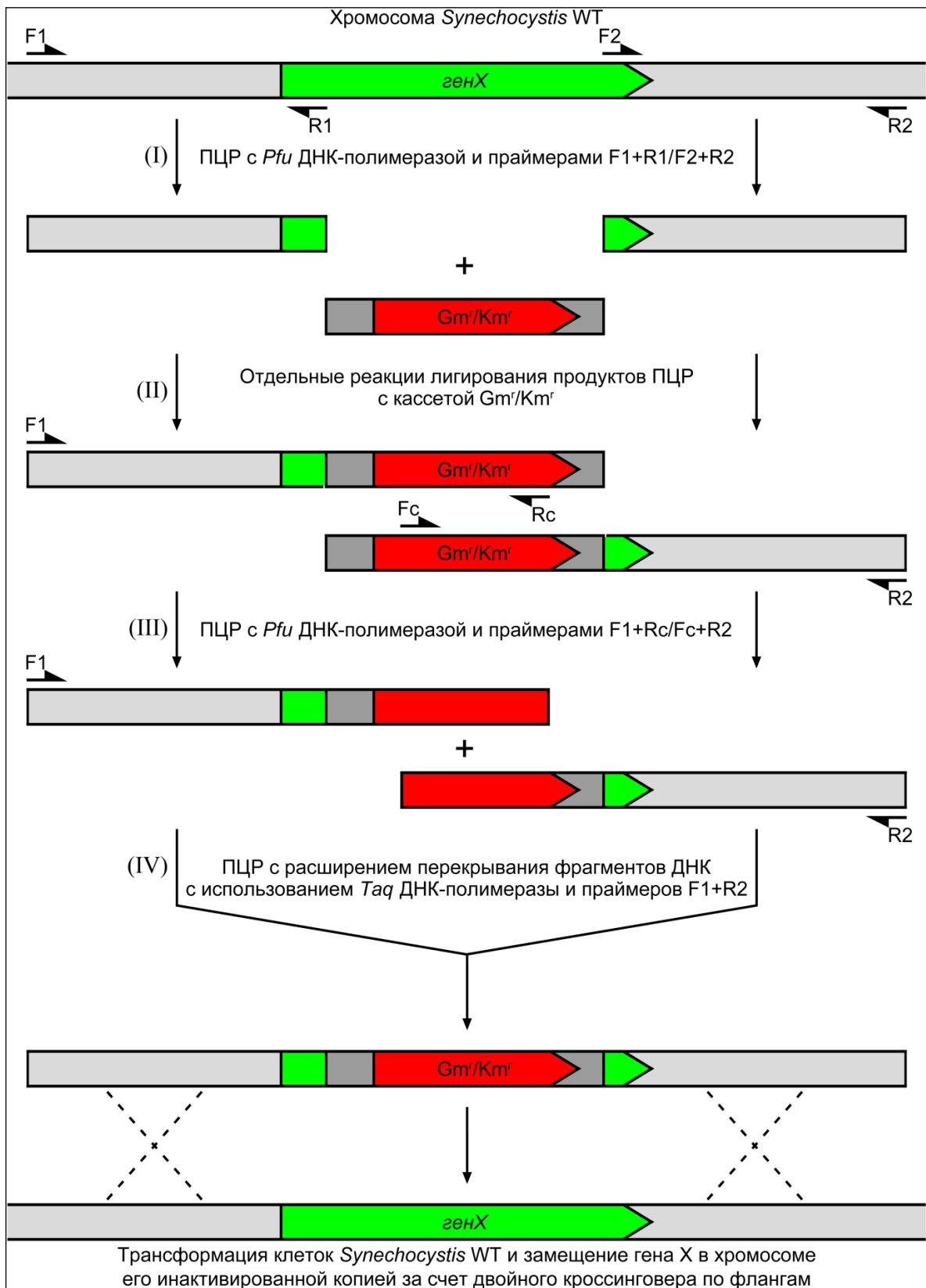


Рис. 2. Стратегия направленной инактивации генов *Synechocystis*, использованная нами в данной работе. Горизонтальные полустрелки – праймеры ПЦР: F1, R1, F2 и R2 к гену X (зеленый) либо Fc и Rc к кассете Gm^r или Km^r (красная стрелка с темно-серыми флангами). ДНК-продукты *Pfu*-ПЦР и кассета Gm^r/Km^r имеют тупые концы, которые свободно сшиваются ДНК-лигазой (лигирование). В самом низу представлен механизм замещения гена X в хромосоме (геноме) его мутантным

производным за счет двух актов гомологичной рекомбинации, или двойного кроссинговера (иксообразно пересекающиеся штриховые отрезки), по флангам гена и кассеты Gm^r/Km^r.

Результаты и обсуждение

TonB-зависимая утилизация дигидроксаматных ксеносидерофоров цианобактерией *Synechocystis*

Биоинформатический анализ генома *Synechocystis* выявил в нем 14 генов предсказываемых компонентов транспорта Fe-сидерофоров [20; 24]: 4 гена (*schT*, *fhuA1*, *-A2* и *-A3*) TonB-зависимых транспортеров (TBDTs) наружной мембраны; 4 гена (*fecB1*, *-B2*, *-B3* и *-B4*) периплазматических связывающих [сидерофор] белков (PBPs); 3 гена (*fecC*, *-D* и *-E*) компонентов корового ABC-транспортера внутренней мембраны, а также 3 гена (*tonB*, *exbB1* и *exbD1*) компонентов TonB-системы (Рисунок 3). Руководствуясь косвенными указаниями на потенциальную субстратную специфичность предполагаемых TBDTs *Synechocystis*, мы выбрали 5 ксеносидерофоров с целью проверки их способности служить единственными источниками железа для роста данной цианобактерии. Конкретно, это 2 тригидроксаматных феррисидерофора, FCH и FOB, и 3 дигидроксаматных – FeAB, FeSK (Рисунок 1), а также сидерофор SAV *A. variabilis*, детальная химическая структура которого не расшифрована [44].

Конструирование мутантов Δ tonB и Δ exbBD1 *Synechocystis*

Еще в начале работы нами было обнаружено, что дигидроксаматный ксеносидерофор FeSK при добавлении в среду YBG11-Fe обеспечивает нормальный рост штамма WT цианобактерии *Synechocystis* и, следовательно, может служить для нее эффективным источником железа. Согласно общепринятой модели TonB-зависимого транспорта Fe-сидерофоров у грамотрицательных бактерий можно было полагать, что утилизация ксеносидерофора клетками *Synechocystis* зависит от функционирования ее системы TonB-ExbB-ExbD. Для проверки этого предположения нами были сконструированы мутанты *Synechocystis* Δ tonB и Δ exbBD1 с инактивированными генами *tonB* и *exbB1-exbD1*, соответственно (Рисунок 4). Здесь важно отметить, что на Рисунке 4 представлены структуры и результаты ПЦР-анализа еще 4 мутантов, Δ fhuA2, Δ feoB, Δ futC и Δ futB, сконструированных и исследованных в логической связи с мутантами Δ tonB и Δ exbBD1. Поскольку подробное описание этих 6 мутантов в совокупности является стереотипным для данного исследования, далее с целью облегчения восприятия статьи опущены детали молекулярного анализа 10 других изученных нами мутантов (см. Рисунок 7).

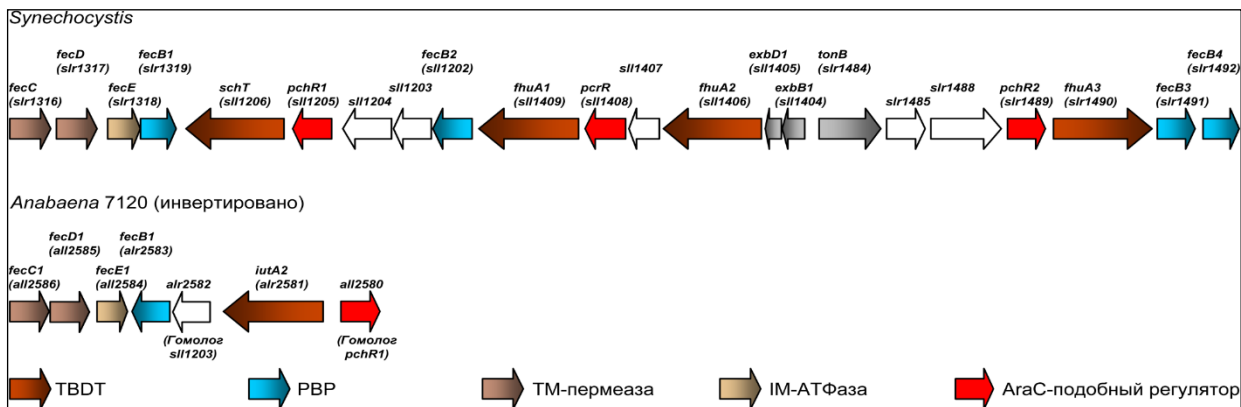


Рис. 3. Кластер генов *Synechocystis*, 14 из которых кодируют все потенциально необходимые белки для поглощительного транспорта Fe-сидерофоров [20; 24]. Гены с различающимися транспортными функциями закрашены разным цветом и, в частности, серым – три гена ТонВ-системы, *tonB*, *exbB1* и *exbD1*. Красным выделены 3 гена возможных AraC-подобных регуляторов транскрипции, функции которых в данной статье не обсуждаются. В нижней части показан сходный отрезок генома цианобактерии *Anabaena* 7120, в пределах которого *fecB1* и *iutA2* (структурный и функциональный гомолог *schT* *Anabaena* 7120) участвуют в контроле импорта ее собственного сидерофора FeSK [37]. ТМ – трансмембранная (пермеаза); ИМ – связанная с внутренней мембраной (АТФаза); остальные сокращения разъяснены в тексте.

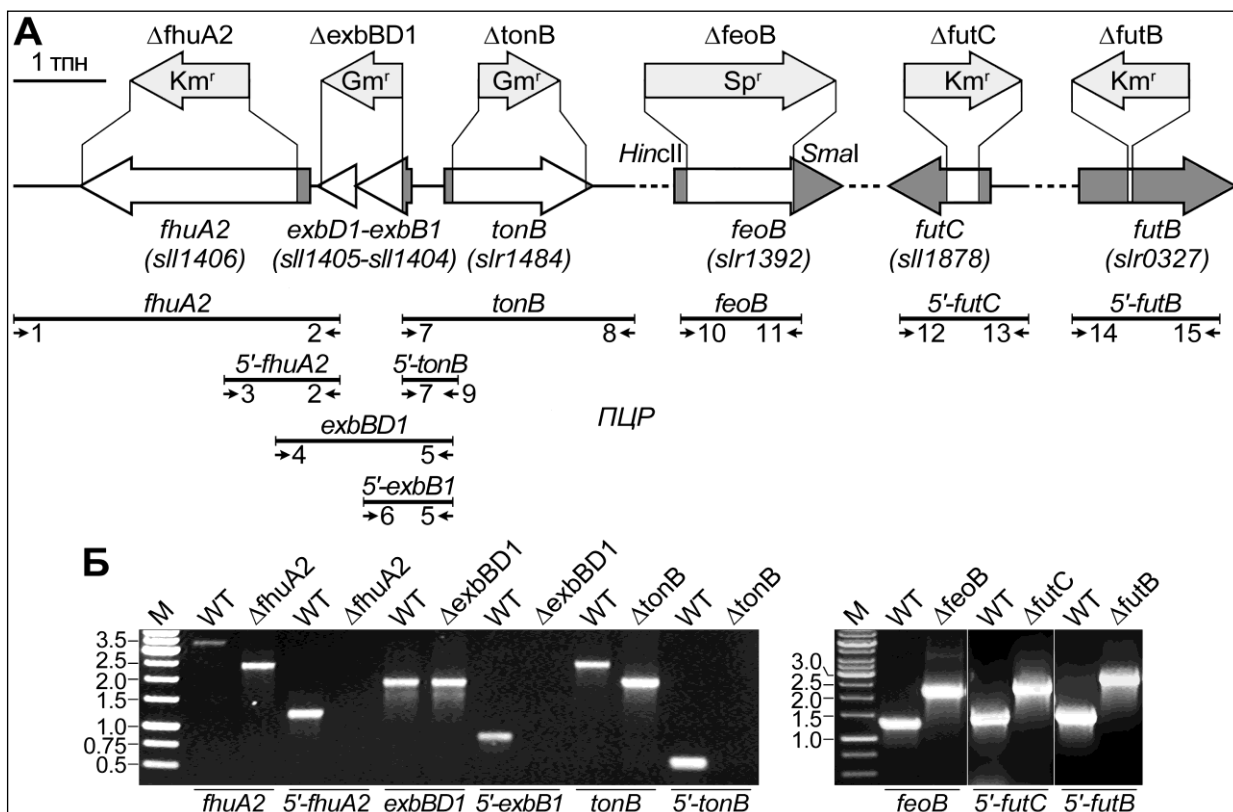


Рис. 4. Молекулярная структура и доказательство гомозиготного статуса мутантов $\Delta fhuA$ 2, $\Delta exbBD1$, $\Delta tonB$, $\Delta feoB$, $\Delta futC$ и $\Delta futB$ *Synechocystis*. (А) Делеционно-инсерционная инактивация генов *fhuA2*, *exbB1-exbD1*, *tonB*, *feoB*, *futC* и *futB* у мутантов. Белые участки генов – делеции; светло-серые стрелки, проецируемые сверху на делеции – инсерции кассет устойчивости Km^r , Gm^r или Sp^r . Отрезки,

надписанные именами генов – участки генома для ПЦР-анализа; нумерованные стрелки под ними – использованные праймеры (для простоты без названий). (Б) Электрофореграммы агарозных гелей с продуктами ПЦР-анализа геномов мутантов и штамма WT (контроль). Отсутствие специфического фрагмента (полосы) ДНК штамма WT в ПЦР-пробе мутанта доказывает его гомозиготность. М – ДНК-маркеры (тпн).

Ксеносидерофоры тригидроксаматного типа FCH и FOB не обеспечивают рост *Synechocystis* железом

В вышеописанном кластере генома *Synechocystis* три гена, *fhuA1*, *-A2* и *-A3*, кодируют потенциальные TBDTs Fe-сидерофоров тригидроксаматного типа [20; 24] (Рисунок 3). Как видно из Рисунка 5 (А, Б), штамм WT и мутанты ΔtonB и ΔexbBD1 плохо росли в среде YBG11-Fe, а в присутствии FCH и FOB уровни их роста даже еще больше снижались.

Следовательно, тригидроксаматные ксеносидерофоры FCH и FOB не могут служить источниками железа для *Synechocystis*.

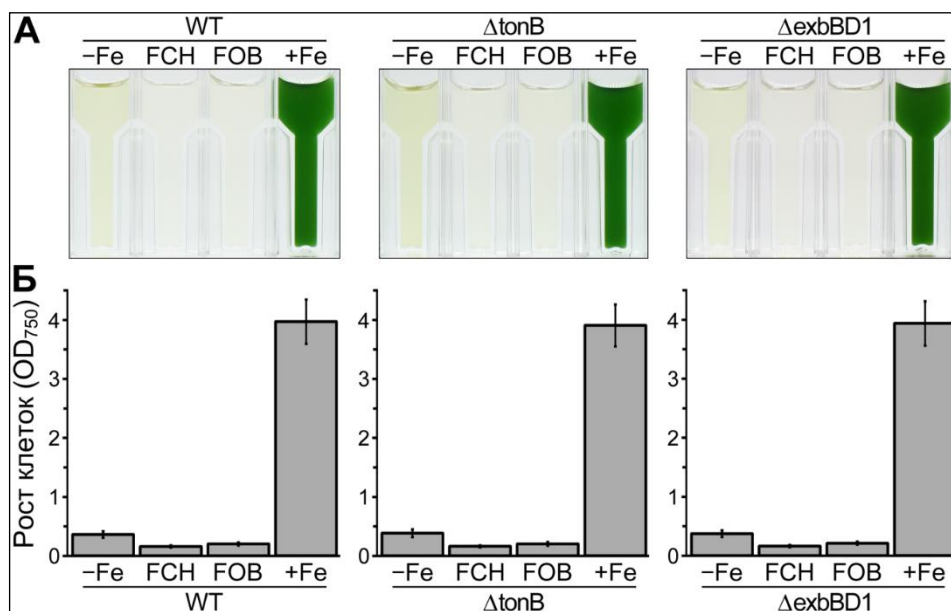


Рис. 5. Девятидневные культуры штамма WT и мутантов ΔtonB и ΔexbBD1 *Synechocystis* в среде YBG11-Fe (без железа; -Fe) либо в ней же, но с 10 мкМ тригидроксаматных ксеносидерофоров FCH или FOB. (А) Фотографии и (Б) значения OD₇₅₀ соответствующих культур (средние со стандартными отклонениями в 3 независимых опытах). Положительные контроли (+Fe): культуры в стандартной среде YBG11.

Ксеносидерофоры FeSK и SAV дигидроксаматного типа служат эффективными источниками железа для *Synechocystis*, и их поглощение цианобактерией зависит от функционирования системы TonB-ExbB1-ExbD1

Известными продуцентами SK и SAV в местах обитания цианобактерий являются их нитчатые формы рода *Anabaena*: SK – *Anabaena* sp. PCC 6411 [40] и *Anabaena* sp. PCC 7120 [17], SAV – *A. variabilis* [44]. Эти два ксеносидерофора, а также FeAB того же типа, были проверены нами в роли возможных источников железа для *Synechocystis*. Так же, как было показано выше (Рисунок 5), штамм WT и мутанты Δ tonB и Δ exbBD1 плохо росли в среде YBG11-Fe (Рисунок 6, А и Б). Однако в присутствии FeSK или SAV рост штамма WT, но не мутантов (что важно подчеркнуть), практически полностью восстанавливался. Третий дигидроксаматный ксеносидерофор FeAB не восстанавливал рост ни одного из трех сравниваемых штаммов в среде без неорганического железа (Рисунок 6, А и Б). Таким образом, штамм WT *Synechocystis* может эффективно использовать ксеносидерофоры FeSK и SAV в качестве альтернативных источников железа, тогда как мутанты Δ tonB и Δ exbBD1, напротив, не могут.

Поскольку гены *exbB1-exbD1* объединены в один оперон со следующим за ними по направлению транскрипции геном *fhuA2* (\rightarrow *exbB1-exbD1-fhuA2*) [25; 43], обнаруженный фенотип мутанта Δ exbBD1 мог быть обусловлен «полярной» инактивацией гена *fhuA2*, кодирующего предполагаемый TBDT [20; 24]. Поэтому нами был сконструирован и полностью сегрегирован мутант Δ fhuA2 (Рисунок 4, А, Б), изучение которого, однако, не выявило каких-либо фенотипических различий между ним и штаммом WT в условиях данной работы.

Таким образом, для утилизации цианобактерией *Synechocystis* ксеносидерофоров дигидроксаматного типа FeSK и SAV, эффективно удовлетворяющих ее потребность в железе, необходима система TonB-ExbB1-ExbD1. Напротив, белок FhuA2, потенциальный TBDT *Synechocystis*, не является существенным для поглощения этих ксеносидерофоров.

Гены *feoB*, *futB* и *futC* не вовлечены в контроль поглощения железа из FeSK и SAV цианобактерией *Synechocystis*

Известно, что у *Synechocystis* определенное количество Fe(III) выделяется из дигидроксаматного ксеносидерофора FeAB в периплазме путем восстановления до Fe(II) [26; 28], которое, однако, возвратно окисляется в условиях фотоавтотрофного роста [47]. Мы полагали, что ксеносидерофоры FeSK и SAV могут тем же способом служить для *Synechocystis* источниками свободного железа в двух формах, Fe(II) и Fe(III), переносимых далее в цитоплазму специфичными транспортерами внутренней мембраны, FeoB и FutABC, соответственно [24].

Чтобы проверить эту гипотезу, были сконструированы мутанты *Synechocystis*, Δ feoB с инактивированным одноименным транспортером Fe(II), а также Δ futB и Δ futC, у которых нарушены субъединицы соответственно пермеазного и АТФазного компонентов транспортера

Fe(III), FutABC (Рисунок 4). Сообразно известной существенной роли транспортера FutABC в поглощении ионов Fe(III) [24], мутанты $\Delta futB$ и $\Delta futC$ демонстрировали значительно более низкий уровень роста, чем мутант $\Delta feoB$ и штамм WT, не только в отсутствии, но даже в присутствии свободного железа в среде (Рисунок 6, В, а также Б для сравнения с WT). Однако внесение ксеносидерофора FeSK в среду YBG11-Fe приводило к восстановлению роста этих трех мутантов до уровня штамма WT (Рисунок 6, В и Б соответственно). Следовательно, гены *feoB*, *futB* и *futC* функционально не связаны с использованием цианобактерией FeSK в качестве единственного источника железа (то же самое установлено в отношении SAV; данные не показаны).

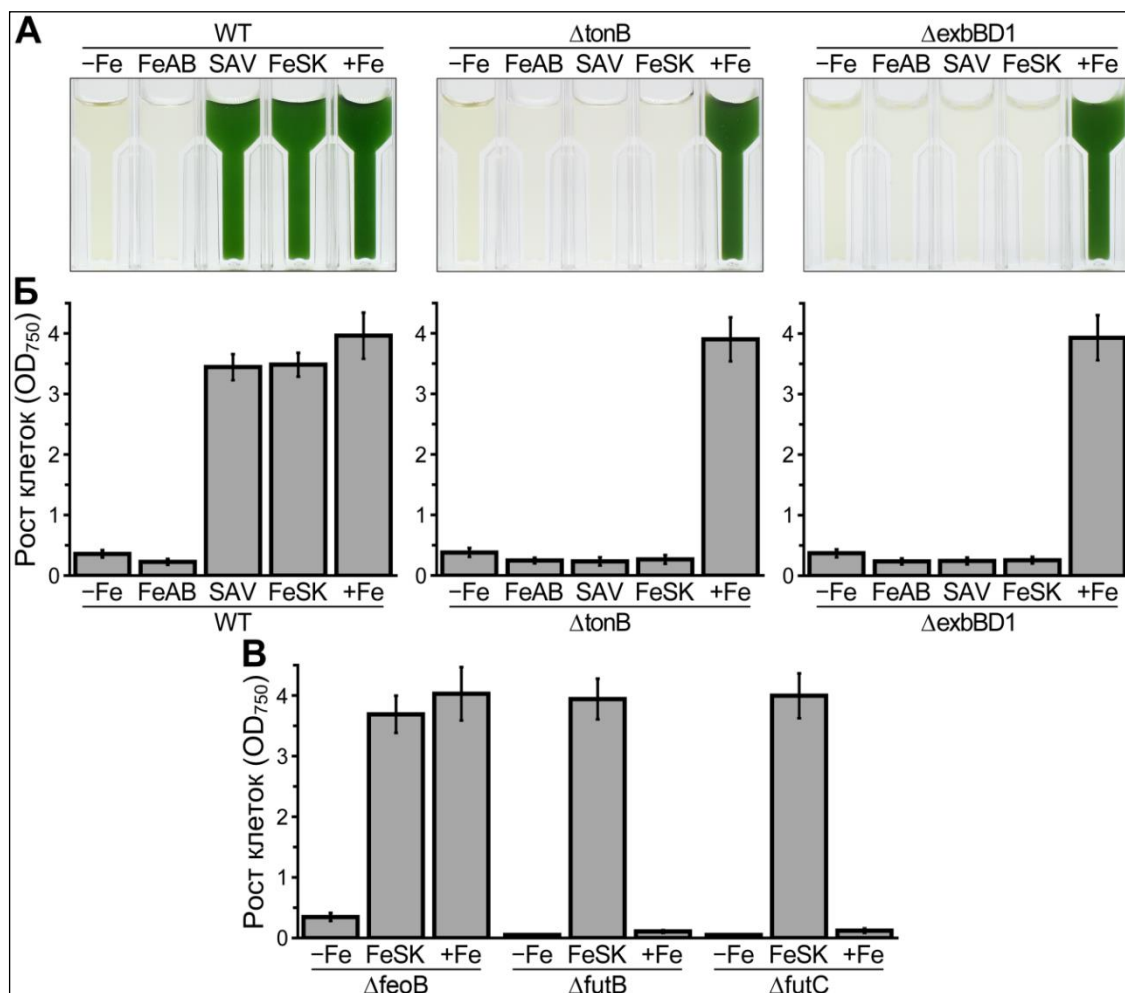


Рис. 6. Девятидневные культуры штамма WT и мутантов $\Delta tonB$, $\Delta exbBD1$, $\Delta feoB$, $\Delta futB$ и $\Delta futC$ *Synechocystis* в среде без железа (-Fe) либо в ней же, но с 10 мкМ дигидроксаматных ксеносидерофоров FeAB, SAV или FeSK.

(A) Фотографии и (Б) OD₇₅₀ культур штамма WT и мутантов $\Delta tonB$ и $\Delta exbBD1$. (В) OD₇₅₀ культур мутантов $\Delta feoB$, $\Delta futB$ и $\Delta futC$. Положительные контроли (+Fe): культуры в стандартной среде YBG11. Приведены средние значения OD₇₅₀ со стандартными отклонениями в 3 независимых опытах.

Функции генов субкластера *fecCDEB1-schT* необходимы для утилизации ксеносидерофоров дигидроксаматного типа цианобактерией *Synechocystis*

Кроме выше охарактеризованных генов *tonB*, *exbB1*, *exbD1* и *fhuA2*, еще 10 поименованных генов изучаемого кластера (Рисунок 3) претендовали на участие в контроле импорта ксеносидерофоров FeSK и SAV у *Synechocystis*. Немалый интерес представлял субкластер из 5 генов, *fecC*, *fecD*, *fecE*, *fecB1* и *schT*, которые согласно их предполагаемым функциям могли полностью обеспечивать прямой путь поглощения ксеносидерофоров. Итак, оставшиеся 10 «генов-претендентов» тоже были инактивированы, и отобранные мутанты (Рисунок 7) полностью сегрегировали в стандартной среде (данные не показаны).

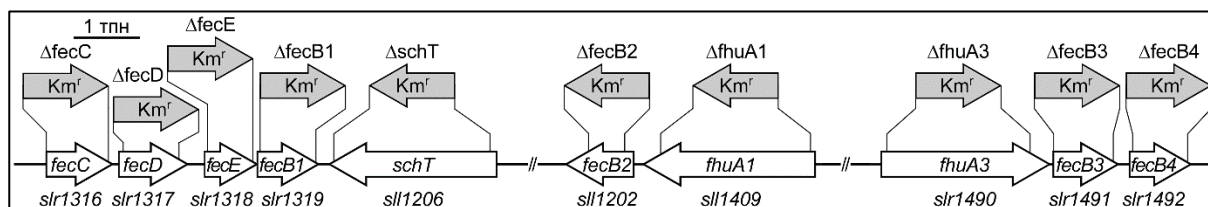


Рис. 7. Молекулярная структура мутантов $\Delta fecC$, $\Delta fecD$, $\Delta fecE$, $\Delta fecB1$, $\Delta schT$, $\Delta fecB2$, $\Delta fhuA1$, $\Delta fhuA3$, $\Delta fecB3$ и $\Delta fecB4$ *Synechocystis*. Представлена схема инактивации соответствующих генов (белые стрелки) с замещением их делетированных участков кассетой устойчивости к канамицину, Km^r (серые стрелки). Гомозиготный статус каждого из этих 10 мутантов был подтвержден конкретными результатами ПЦР-анализа (не показано).

Фенотипический анализ последних 10 полученных мутантов *Synechocystis* показал, что инактивация каждого из 5 генов субкластера *fecCDEB1-schT* нарушает рост соответствующего мутанта в присутствии FeSK или SAV (Рисунок 8, А, Б). Напротив, в случае инактивации *fecB2*, *fecB3*, *fecB4*, *fhuA1* или *fhuA3* нарушения роста мутантов при тех же условиях не наблюдали (Рисунок 8, В, Г).

Таким образом, ксеносидерофоры FeSK и SAV дигидроксаматного типа являются биодоступными и эффективными источниками железа для цианобактерии *Synechocystis*, неспособной продуцировать собственные сидерофоры. Указанные ксеносидерофоры утилизируются *Synechocystis* с помощью прямого TonB-зависимого транспорта в цитоплазму клетки без участия основных систем транспорта неорганического железа FeoV и FutABC. Кроме 3 генов TonB-системы, в контроль утилизации этих ксеносидерофоров вовлечены 5 генов субкластера *fecCDEB1-schT*. Кодлируемые этими генами белки являются компонентами классической системы поглощения Fe-сидерофоров у грамотрицательных бактерий. На основании результатов проведенного нами исследования предложена модель транспорта Fe-сидерофоров дигидроксаматного типа в клетку *Synechocystis* (Рисунок 9). Кстати, ген *schT*

Synechocystis был нами так назван по имени ближайшего гомолога у *Anabaena* 7120 – гена *schT* (schizokinen Transporter), кодирующего основной TBDT эндогенного FeSK [30].

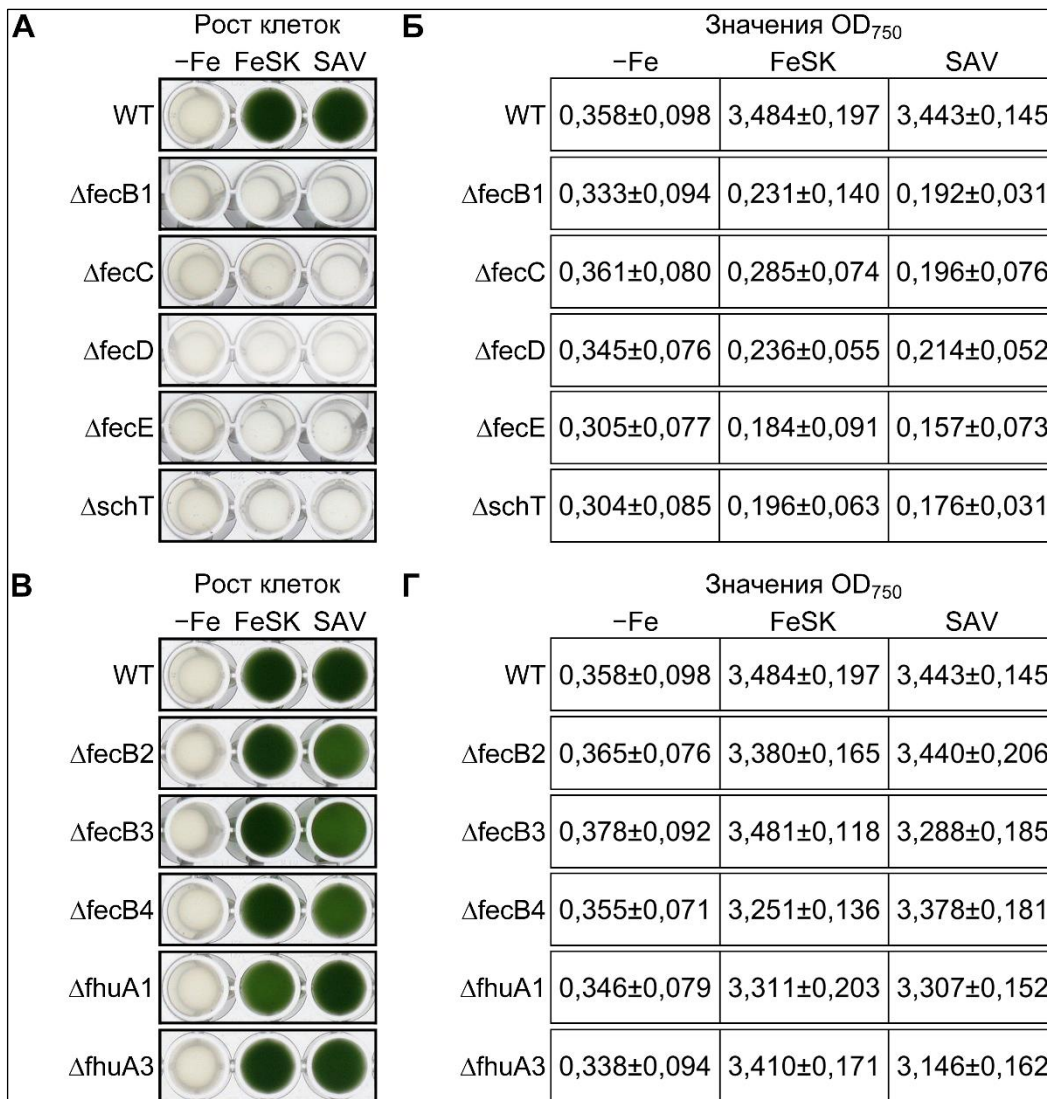


Рис. 8. Девятидневные культуры штамма WT и 10 мутантов с нарушенными генами изучаемого кластера, ΔfecB1, ΔfecB2, ΔfecB3, ΔfecB4, ΔfecC, ΔfecD, ΔfecE, ΔfhuA1, ΔfhuA3 и ΔschT, *Synechocystis* в среде YBG11-Fe (-Fe) либо в ней же, но с 10 мкМ FeSK или SAV.

(А и В) Фотографии лунок микропланшета с аликвотами культур, усваивающих (В) либо неусваивающих (А) FeSK или SAV как единственные источники железа. (Б и Г) значения OD₇₅₀ соответствующих культур (средние со стандартными отклонениями в трех независимых опытах).

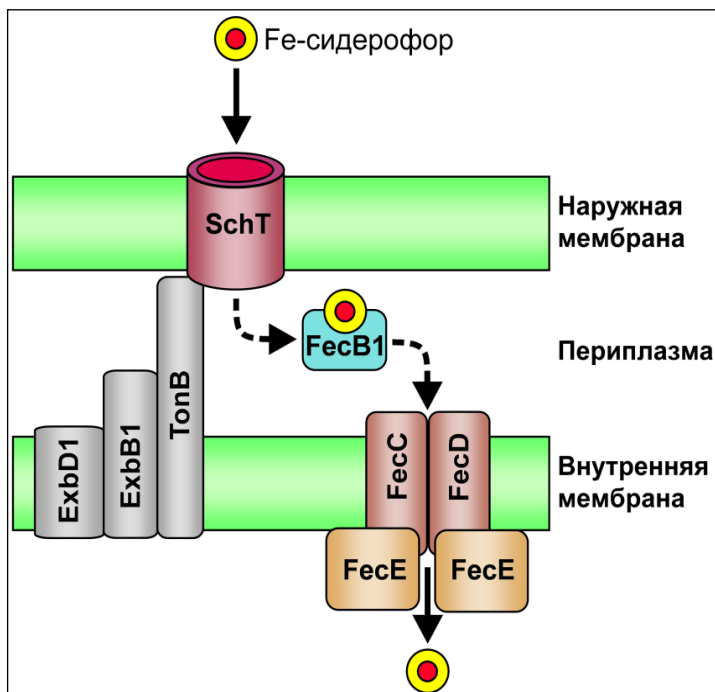


Рис. 9. Модель транспорта Fe-сидерофоров дигидрохсаматного типа в клетку *Synechocystis*.

В заключение важно отметить, что активными продуцентами СК в природе, помимо цианобактерий, являются часто встречающаяся бактерия *Bacillus megaterium* [31], а также патоген и симбионт растений, *Ralstonia solanacearum* [9] и *Rhizobium leguminosarum* IARI 917 [42]. Вместе с тем СК проявляет высокую стабильность не только в воде, но и в высохшей почве [2]. Поэтому *Synechocystis*, не затрачивая свои внутренние ресурсы на продукцию сидерофоров, может эффективно конкурировать с другими микроорганизмами за источники железа в ее естественной среде обитания.

Список литературы

(использованы сокращенные ссылки из популяризируемых работ авторов данной статьи)

1. Миллер Дж. Эксперименты в молекулярной генетике. М.: Мир, 1976. 440 с.
2. Akers (1983) Appl Environ Microbiol 45:1704–1706
3. Andrews et al (2003) FEMS Microbiol Rev 27:215–237.
4. Archibald (1983) FEMS Microbiol Lett 19:29–32.
5. Babykin et al (2018) Curr Microbiol 75:117–123.
6. Boyd et al (2007) Science 315:612–617.
7. Boyer et al (1987) Iron chelation and uptake. In: ...The cyanobacteria. Elsevier, Amsterdam, New York & Oxford: 415–436.
8. Braun et al (1998) Bacterial iron transport... Met Ions Biol Syst 35:67–145.

9. Budzikiewicz et al (1997) *Z Naturforsch* 52c:496–503.
10. Bullerjahn, Post (2014) *Front Microbiol* 5:359.
11. Chu et al (2010) *Biometals* 23:601–611.
12. Cornell, Schwertmann (2006) *The iron oxides...* John Wiley & Sons.
13. Fiore, Trevors (1994) *BioMetals* 7: 83–103.
14. Flombaum et al (2013) *PNAS USA* 110:9824–9829.
15. Frausto da Silva, Williams (2001) *The biological chemistry...* University Press, Oxford.
16. Gledhill, Buck (2012) *Front Microbiol* 3:69.
17. Goldman et al (1983) *J Bacteriol* 156:1144–1150.
18. Gough, Murray (1983) *J Mol Biol* 166:1–19.
19. Griese et al (2012) *FEMS Microbiol Lett* 323:124–131.
20. Kaneko et al (1996) *DNA Res* 3:109–136.
21. Karl et al (1997) *Nature* 388:533–538.
22. Karl et al (2002) *Biogeochem* 57: 47–98.
23. Keren et al (2004) *Plant Physiol* 135:1666–1673.
24. Katoh et al (2001) *J Bacteriol* 183:2779–2784.
25. Kopf et al (2014) *DNA Res* 21:527–539.
26. Kranzler et al (2011) *Environ Microbiol* 13:2990–2999.
27. Kranzler et al (2013) *Iron in cyanobacteria...* Elsevier Ltd, Netherlands, Amsterdam, 57–105.
28. Lis et al (2015) *Life* 5:841–860.
29. Mann, Chisholm (2000) *Limnol Oceanogr* 45:1067–1076.
30. Mirus et al (2009) *BMC Biol* 7:68.
31. Mullis et al (1971) *Biochemistry* 10:4894–4898.
32. Neilands (1995) *J Biol Chem* 270:26723–26726.
33. Nikawa, Kawabata (1998) *Nucleic Acids Res* 26:860–861.
34. Obando et al (2018) *Current Microbiology* 75(9):1165–1173.
35. Raines et al (2015) *Siderophores*. In: Elsevier Reference...Waltham: Elsevier, 1–32.
36. Rudolf et al (2015) *Mol Microbiol* 97:577–588.
37. Rudolf et al (2016) *Plant Mol Biol* 92:57–69.
38. Shcolnick et al (2007) *Biochim Biophys Acta* 1767:814–819.
39. Schopf (1993) *Science* 260: 640–646.
40. Simpson, Neilands (1976) *J Phycol* 12:44–48.
41. Stevanovic et al (2012) *Environ Microbiol* 14:1655–1670.
42. Storey et al (2006) *Biometals* 19:637–649.
43. Suzuki et al (2001) *Mol Microbiol* 40:235–244.
44. Trick, Kerry (1992) *Curr Microbiol* 24:241–245.
45. Vraspir, Butler (2009) *Annu Rev Mar Sci* 1:43–63.
46. Wandersman, Delepelaire (2004) *Annu Rev Microbiol* 58:611–647.
47. Xu et al (2016) *Environ Microbiol* 18:5005–5017.

48. Xu et al (2013) Hydrobiol 700:187–202.

49. Zappa, Bauer (2017) The maintenance of iron homeostasis...Springer International Publishing AG, 123–162.

URL диссертации Обандо С.Т.А.

http://vigg.ru/fileadmin/user_upload/Dissertatsionnyy_sovet/Kandidatskie_dissertatsii/2019/OBANDO/Obando_STA DISSERTACIJA-2019.pdf.

URL автореферата Обандо С.Т.А.

http://www.vigg.ru/fileadmin/user_upload/Dissertatsionnyy_sovet/Kandidatskie_dissertatsii/2019/OBANDO/Obando_STA AVTOREFERAT.pdf.

Идентификация микроорганизмов, выделенных из микробиоты Белого моря

Кравцова Т.Р.^{1,2}, Толстиков А.В.³, Белевич Т.А.²

¹ Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова,
Международный учебно-научный биотехнологический центр, г. Москва, Россия

² Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова,
биологический факультет, г. Москва, Россия

³ Институт водных проблем Севера Карельского НЦ РАН, г. Петрозаводск, Россия

Одноклеточные водоросли и цианобактерии широко распространены в водных экосистемах и могут играть ключевую роль, давая до 40% суммарной фотосинтетической продукции. Их идентификация представляет значительную трудность в силу отсутствия явно выраженных морфологических признаков, ультраструктурной пластичности, деформации или полного разрушения клеток при фиксации проб (Perkerson et al., 2011). Для нахождения таксономического положения таких микроорганизмов с успехом используются молекулярно-генетические методы. Именно на основе их применения выявлено, что значительная часть видов одноклеточных организмов в природных водных экосистемах еще не идентифицирована, соответственно, отсутствуют сведения об их распространении в естественных средах обитания и функциональной роли в экосистемах (Follows et al., 2007). Корректная идентификация видов водорослей крайне важна для понимания экологии водных экосистем и глобальной биохимии, а также для успешного использования водорослей в биотехнологии.

Многие микроорганизмы формируют симбиотические ассоциации с беспозвоночными животными разных таксономических групп (Заика, 1991). Колониальный гидроид *Dynamena pumila*, обитающий в Белом море, образует ассоциации с кислородно фототрофными микроорганизмами (ОФМ). Три изолята ОФМ было выделено из симбиотического сообщества гидроида *D. pumila*. Для их видовой идентификации в качестве молекулярного маркера была выбрана нуклеотидная последовательность, содержащая большую часть гена 16S рРНК, внутренний транскрибируемый спейсер 16S-23S рРНК и часть гена 23S рРНК. ОФМ идентифицированы как цианобактерии *Synechococcus* sp., *Leptolyngbya* sp., *Nostoc* sp. Генотипы всех трех ОФМ оказались уникальными. Филогенетический анализ типированных *Synechococcus* sp., *Leptolyngbya* sp., и *Nostoc* sp. показал, что их ближайшие родственники обитают в разных биотопах как морских, так и пресных водоемов разных широт на нескольких материках (Koksharova et al., 2013).

Изменяющиеся названия видов отдела Chlorophyta семейства Scenedesmaceae родов *Scenedesmus* и *Desmodesmus*, широко распространенных в пресноводных экосистемах, также

затрудняют идентификацию водорослей (Eliáš et al., 2010). Была проведена молекулярная идентификация и филогенетический анализ эукариотической зеленой микроводоросли 1Нр86Е-2, изолированной из губки *Halichondria panicea* (Pallas, 1766), обитающей в Белом море. В качестве молекулярного маркера выбрана нуклеотидная последовательность гена 18S рРНК малой субъединицы рибосомы. Исследование позволило отнести изолят 1Нр86Е-2 к роду *Desmodesmus*, который показал наибольшее родство с водорослями — *Desmodesmus* sp. 3Dp86Е-1, изолированной из гидроидного полипа *D. pumila*, с 2С166Е, изолированной из гидроида *Coryne lovenii* (M. Sars, 1846), с 1Pm66В, изолированной из трохофорных личинок полихеты *Phyllodoce maculate* (L., 1767). Филогенетический анализ показал, что это близкородственные организмы, представители одной монофилитической группы (Кравцова и др., 2013).

Известно, что культивируемые микроорганизмы составляют менее 5% от общего числа в естественных средах обитания. В связи с этим идентификация некультивируемых форм возможна только с помощью метода метагеномного анализа. Исследовано генетическое разнообразие видового состава беломорского планктона класса Trebouxiophyceae методом высокопроизводительного секвенирования области V4 гена 18S рРНК. Выявленные последовательности имеют наибольшее сходство 97% и выше с представителями родов: *Apatococcus*, *Choricystis*, *Myrmecia*, *Picochlorum*, *Chloroidium*, *Dictyochloropsis* и *Trebouxia* (Белевич и др., 2022).

При идентификации нового таксона, для уточнения его таксономического положения желательно использовать несколько независимо эволюционирующих маркеров, например, ядерный и хлоропластный. К сожалению, филогенетический анализ нуклеотидной последовательности одного гена не всегда позволяет установить видовое положение таксона.

Так, например, из осеннего планктона Белого моря выделена культура водоросли, последовательность гена 18S рРНК которой имеет более 99% сходства с последовательностями *Deuterostichococcus epilithicus* (MT078166) и почвенной водорослью *Stichococcus* sp. (KX094827). Филогенетический анализ не позволил идентифицировать данную микроводоросль до вида, а определил её до более высокого ранга - семейства. Только дальнейшее исследование, основанное на использовании нескольких молекулярных маркеров, позволит определить видовой статус этой микроводоросли и определить её уникальное место в экосистеме Белого моря.

Список литературы

1. Perkerson R.B., Johansen J.R. Kováčik L., Brand J., Kastovsky J., Casamatta J.D.A. A unique *Pseudanabaenalean* (Cyanobacteria) genus *Nodosilineagen*. nov. based on morphological and molecular data // J. Phycol. 2011. V. 47(6). P. 1397-1412.
2. Follows M.J., Dutkiewicz S., Grant S., Chisholm S.W. Emergent biogeography of microbial communities in a modern ocean // Science. 2007. V. 315. P. 1843–1848.
3. Eliáš M., Němcová Y., Škaloud P., Neustupa J., Kaufnerová V., Šejnohová L. *Hylodesmus singaporensis* gen. et sp. nov. a new autosporic subaerial green alga (Scenedesmaceae, Chlorophyta) from Singapore // J. Sys. and Evol. Microbiol. 2010. V. 60. P. 1224–1235.
4. Заика В.Е. Симбиоз водных животных с водорослями. Киев. Наук. Думка. 1991.
5. Koksharova O.A., Kravzova T.R., Lazebnaya I.V., Gorelova O.A., Baulina O.I., Lazebny O.E., Fedorenko T.A., Lobakova E.S. Molecular identification, ultrastructural and phylogenetic study of cyanobacteria from association with the White Sea hydroid *Dynamena pumila* (L., 1758) // BioMed Res. Int. 2013. V. 2013. <http://dx.doi.org/10.1155/2013/760681>
6. Кравцова Т.Р., Лазебная И.В., Лазебный О.Е., Волкова Е.Ю., Федоренко Т.А., Горелова О.А., Баулина О.И., Лобакова Е.С., Васетенков А.Е., Кокшарова О.А. Молекулярная филогения зелёной микроводоросли, изолированной из *Halichondria panicea* (P., 1766), Белого моря // Физиология растений. 2013. Т. 60. № 4. С. 569-573.
7. Белевич Т.А., Кравцова Т.Р., Милютин И.А. Trebouxiophyceae (Chlorophyta) в пикофракции планктона Белого моря. В сборнике Материалы VI Всероссийской научной конференции с международным участием и школы молодых ученых "Водоросли: проблемы таксономии и экологии, использование в мониторинге и биотехнологии", место издания Москва, тезисы, с. 9-9.

Регуляция уровня простагландинов в человеческом организме с помощью нестероидных противовоспалительных препаратов

Кривошей А.В.^{1,2}, Панова В.В.², Ефремов А.А.², Гольден А.И.³, Вржещ П.В.^{1,2}

¹ Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова, Международный учебно-научный биотехнологический центр, г. Москва, Россия

² Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова, факультет биоинженерии и биоинформатики, г. Москва, Россия

³ Goethe institute Frankfurt, г. Франкфурт-на-Майне, Германия

Простагландины – вещества липидной природы, которые являются медиаторами воспаления, а также регуляторами других важнейших физиологических процессов [1]. Ключевым элементом биосинтеза простагландинов в организме человека является фермент простагландин-Н-синтаза (PGHS). Он катализирует две последовательные реакции: циклооксигеназную (образование простагландина G₂ в результате окисления арахидоновой кислоты (AA) кислородом [2]) и пероксидазную (образование простагландина H₂ [3] в результате восстановления перекисной группы простагландина G₂ до спиртовой в присутствии донора электронов [4]). Далее из простагландина H₂ под действием конвертаз образуются другие физиологически активные соединения - простагландины E₂, D₂, F_{2α}, тромбоксан A₂ и простациклин [5-7]. PGHS подвергается необратимой инактивации в ходе катализируемых реакций [8-12]. Фермент ингибируется нестероидными противовоспалительными препаратами (НПВП) [13-15].

В общем случае, кинетические эксперименты по исследованию свойств ферментов *in vitro* проводятся в закрытых системах, предполагающих добавление фермента, субстратов и других участников реакции в отдельные моменты времени, но без их постоянного притока в реакционную систему. Однако организм представляет собой открытую систему, где происходит синтез и деградация фермента, а приток субстрата может регулироваться различными внешними факторами. Таким образом, кинетические характеристики закрытых систем могут совершенно не соответствовать поведению открытых систем, и, соответственно, систем *in vivo*. Тем не менее, в литературе встречается очень мало исследований кинетического поведения ферментов в открытых системах. В работе [16] рассматривали теоретическую схему, учитывающую факторы синтеза и деградации фермента, а также внешнего притока субстрата. В работе [17] рассматривали случаи различных типов ингибирования с учётом постоянного притока субстрата.

До недавнего времени в открытых системах не было исследовано кинетическое поведение ферментов, подвергающихся инактивации в процессе реакции и действию медленных ингибиторов. В нашей работе 2021 г. [18] мы предложили теоретическую схему,

описывающую влияние ингибиторов на потоки образования и уровни простагландинов в открытых системах, содержащих фермент PGHS (рис. 1).

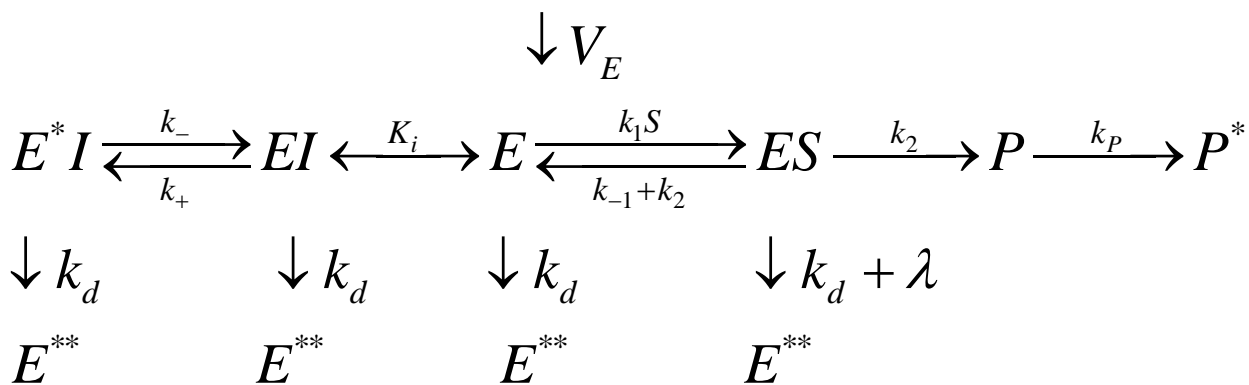


Рис. 1. Преобразования фермента и продукта реакции в открытой системе [18]. E - свободный фермент (PGHS), ES - комплекс фермента с субстратом (S, арахидоновая кислота, AA), EI и E*I - комплексы фермента с ингибитором (I), E** - инактивированная форма фермента, V_E - скорость синтеза (притока) фермента, k_1, k_{-1} - константы скорости образования и диссоциации комплекса ES соответственно, k_2 - константа скорости образования продукта реакции, K_i - константа ингибирования для быстрой обратимой стадии взаимодействия фермента с ингибитором, k_+ и k_- - константы скорости для медленной стадии ингибирования, k_P - константа преобразования физиологически активного продукта (P) в неактивные соединения (P*), λ - константа скорости инактивации фермент-субстратного комплекса в процессе реакции, k_d - константа скорости деградации фермента (принимается, что это значение одинаково для всех форм фермента).

В работе [18] мы моделировали кинетическое поведение открытой системы при наличии индометацина (относится к обратимым ингибиторам) или аспирина (необратимый ингибитор, т.е. значение константы скорости k_- равно 0, см. рис. 1). Значения кинетических параметров были определены из экспериментов по исследованию циклооксигеназной активности PGHS в закрытой системе (в отсутствие ингибитора или при добавлении индометацина), а также взяты из литературных данных (значения констант для закрытой системы в присутствии аспирина, значения времени полужизни простагландинов G_2 и H_2 , а также общие данные по деградации различных ферментов). При моделировании концентрации субстрата и ингибитора считались постоянными, но в некоторые моменты времени в результате внешних возмущений эти концентрации могли мгновенно изменяться. Концентрации AA соответствовали различным условиям в организме (рассматривались 3 варианта - обычные физиологические условия, выраженный ответ организма в процессе воспаления, а также патологическое состояние). Концентрации ингибиторов соответствовали данным фармакологических исследований.

В результате моделирования [18] было показано, что открытая система всегда стремится к устойчивому стационарному состоянию. Переход в нестационарное состояние осуществляется в результате внешнего возмущения (резкого изменения концентрации субстрата или ингибитора), но со временем система всегда приближается к новому стационарному состоянию. Зависимость потока продукта реакции (скорости образования продукта реакции) в стационарном состоянии принимает форму уравнения Михаэлиса-Ментен, а при наличии ингибитора в реакционной системе она соответствует конкурентному типу ингибирования.

Примеры зависимостей уровня продукта реакции (концентрации продукта реакции) от времени для нестационарных состояний после возмущения открытой системы показаны на рис. 2-4 (взяты из [18]).

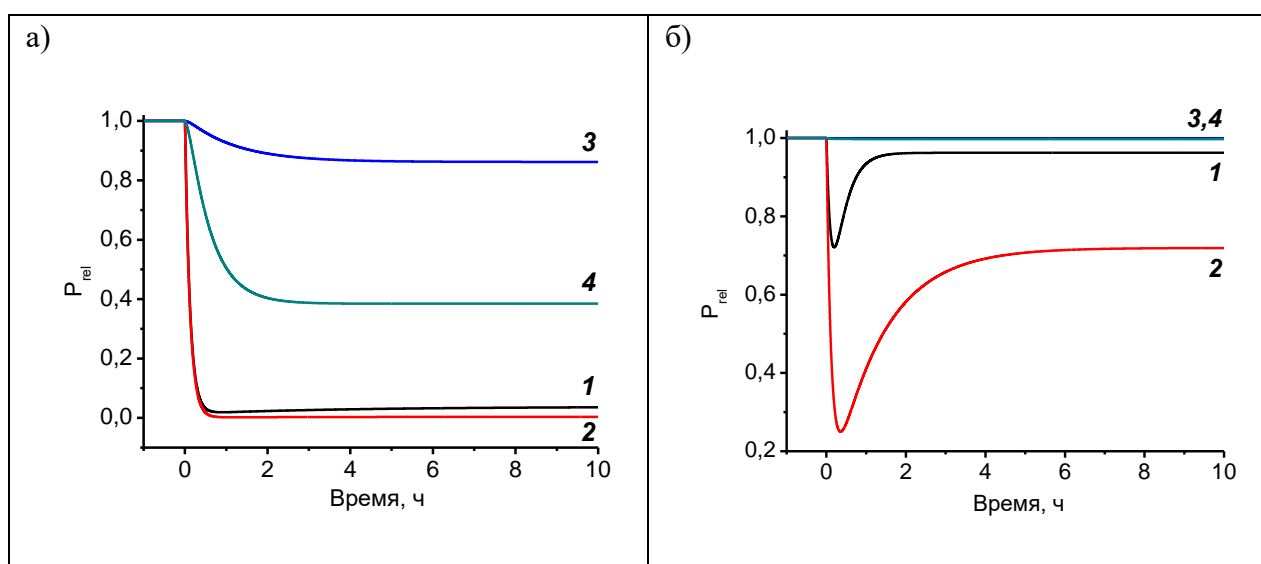


Рис. 2. Влияние изменения концентрации ингибитора на относительный уровень продукта реакции (P_{rel}) в открытой системе [18]. Концентрация арахидоновой кислоты – 0.01 мкМ (а) и 10 мкМ (б). В момент времени $t = 0$ концентрация индометацина увеличилась с 0 до 2 мкМ (1), с 0 до 20 мкМ (2); концентрация аспирина увеличилась с 0 до 10 мкМ (3), с 0 до 100 мкМ (4). За единицу принят уровень продукта реакции до возмущения системы.

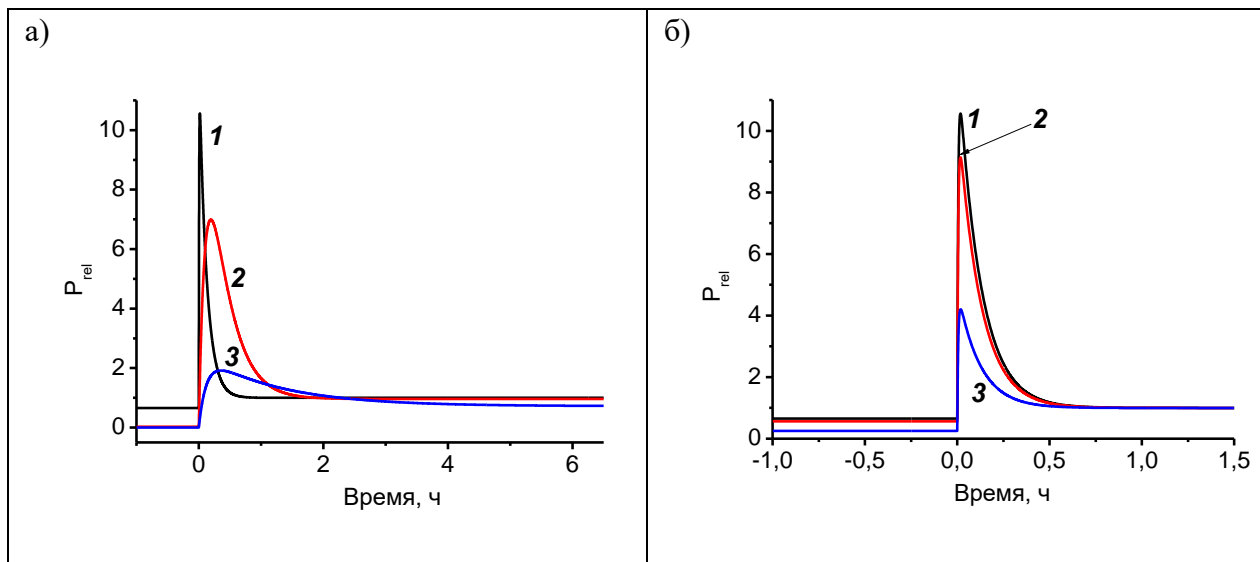


Рис. 3. Влияние изменения концентрации субстрата на относительный уровень продукта реакции (P_{rel}) в открытой системе – эффект индометацина (а) и аспирина (б) [18]. Начальная концентрация арахидоновой кислоты – 0.01 мкМ, а в момент времени $t = 0$ она увеличилась до 10 мкМ. Концентрация индометацина равна 0 мкМ (1), 2 мкМ (2), 20 мкМ (3); концентрация аспирина – 0 мкМ (1), 10 мкМ (2), 100 мкМ (3). За единицу принят максимальный стационарный уровень продукта реакции (при $[S] \rightarrow \infty$ и в отсутствие ингибитора).

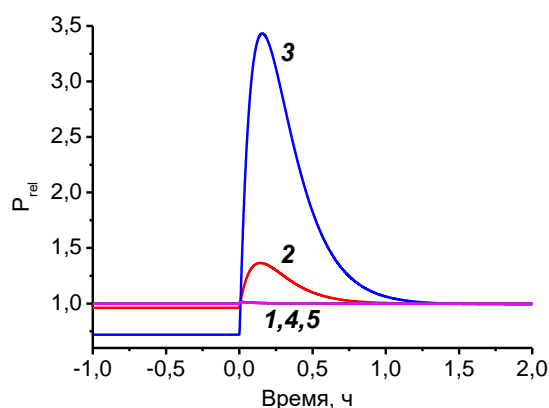


Рис. 4. Влияние изменения концентрации субстрата на относительный уровень продукта реакции (P_{rel}) в открытой системе [18]. Начальная концентрация арахидоновой кислоты – 10 мкМ, а в момент времени $t = 0$ она увеличилась до 500 мкМ. Концентрация индометацина – 0 мкМ (1), 2 мкМ (2), 20 мкМ (3); концентрация аспирина – 0 мкМ (1), 10 мкМ (4), 100 мкМ (5). За единицу принят максимальный стационарный уровень продукта реакции (при $[S] \rightarrow \infty$ и в отсутствие ингибитора).

В результате моделирования нестационарных состояний [18] было показано, что при добавлении индометацина в открытую систему наблюдается двухфазный характер возмущения (рис. 2), т.е. уровень продукта после резкого падения восстанавливается до нового

стационарного состояния. Для необратимого ингибитора аспирина (рис. 2) подобного эффекта не наблюдается.

При резком повышении концентрации субстрата в открытой системе (рис. 3-4) также наблюдается двухфазность – сначала происходит быстрый рост уровня продукта, а затем более медленное падение до нового стационарного состояния. В этом случае в присутствии индометацина (рис. 3а) (в отличие от аспирина, рис. 3б) наблюдается парадоксальный эффект повышения уровня продукта по сравнению с контролем без ингибитора. Его также можно объяснить обратимостью ингибитора: сначала происходит накопление фермент-ингибиторных комплексов, а затем высвобождение фермента из них при повышении концентрации субстрата. Т.е. обратимый ингибитор ведёт себя как «депо» для активного фермента.

Стоит заметить, что если начальная концентрация субстрата достаточно высока (рис. 4), то при его резком возрастании в отсутствие ингибитора уровень продукта практически не меняется, а при наличии обратимого ингибитора в реакционной системе возрастание уровня продукта и, соответственно, эффект «депо» более заметны для высоких концентраций ингибитора. Это можно объяснить тем, что концентрация фермент-ингибиторных комплексов в стационарном состоянии (до резкого повышения концентрации субстрата) принимает большие значения для более высоких концентраций ингибитора, и, соответственно, количество высвобождаемого фермента (как и изменение потока продукта) в результате возмущения также увеличивается по сравнению с более низкими концентрациями ингибитора. Кроме того, в отличие от рис. 3а, индометацин на рис. 4 в гораздо меньшей степени проявляет ингибирующие свойства из-за конкурентного характера ингибирования, что и приводит к наблюдаемому увеличению эффекта «депо» при высоких концентрациях ингибитора.

Далее в работе [19] мы исследовали, как фактор инактивации фермента в процессе реакции влияет на уровень продукта в открытой системе в присутствии индометацина (рис. 5).

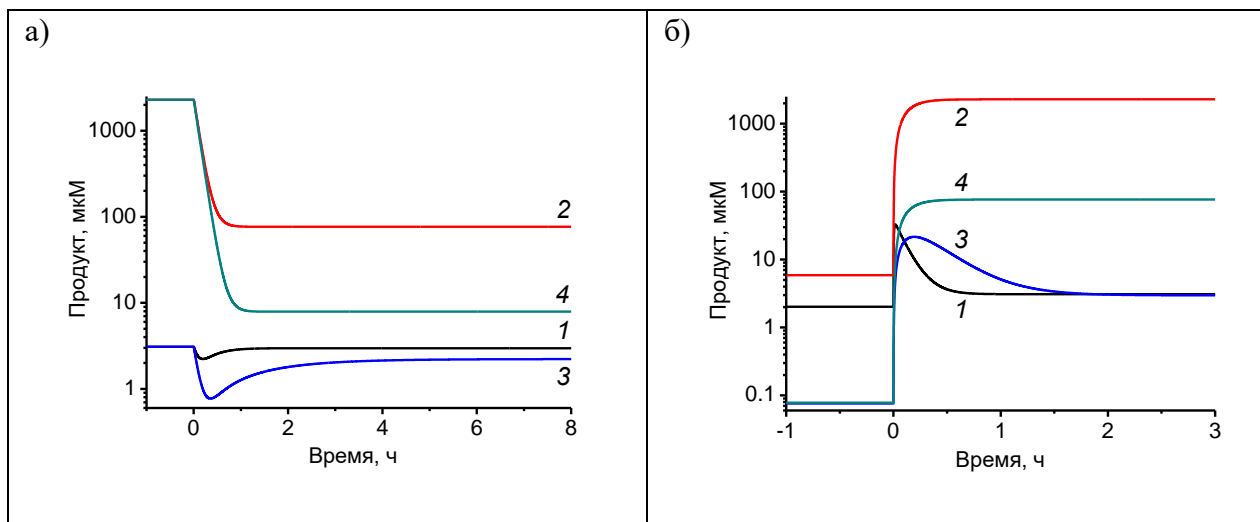


Рис. 5. [19] (а) Влияние изменения концентрации ингибитора на уровень продукта реакции в открытой системе. Концентрация арахидоновой кислоты – 10 мкМ. В момент времени $t = 0$ концентрация индометацина увеличилась с 0 до 2 мкМ (1, 2), с 0 до 20 мкМ (3, 4). (б) Влияние изменения концентрации субстрата на уровень продукта реакции в открытой системе. Начальная концентрация арахидоновой кислоты – 0.01 мкМ, а в момент времени $t = 0$ она увеличилась до 10 мкМ. Концентрация индометацина – 0 мкМ (1, 2), 2 мкМ (3, 4).

1, 3 – есть инактивация фермента в процессе реакции. 2, 4 – инактивации нет. Все зависимости приведены в полулогарифмических координатах. Скорость синтеза фермента принималась равной 10^{-5} мкМ/сек, значения остальных параметров и формулы приведены в [18].

Было показано, что эффекты, наблюдаемые в присутствии индометацина (двухфазный характер возмущения в результате добавления ингибитора, а также повышение уровня продукта по сравнению с контролем без ингибитора при резком повышении концентрации субстрата), не проявляются в отсутствие инактивации фермента в ходе реакции. Таким образом, инактивация PGHS является стабилизирующим фактором для уровня простагландина в системе, т.е. после резкого изменения в ту или иную сторону этот уровень частично восстанавливается.

В настоящем исследовании мы продолжили моделирование синтеза простагландинов в системе, содержащей фермент PGHS. Мы рассмотрели условия, аналогичные рис. 2-4, но в том числе для тех гипотетических случаев, когда одновременно с возмущением системы (при $t = 0$) прекращается синтез фермента. То есть, показано влияние фактора «открытости» реакционной системы (наличия постоянного притока фермента) на изменение уровня продукта реакции от времени в результате возмущения системы (рис. 6).

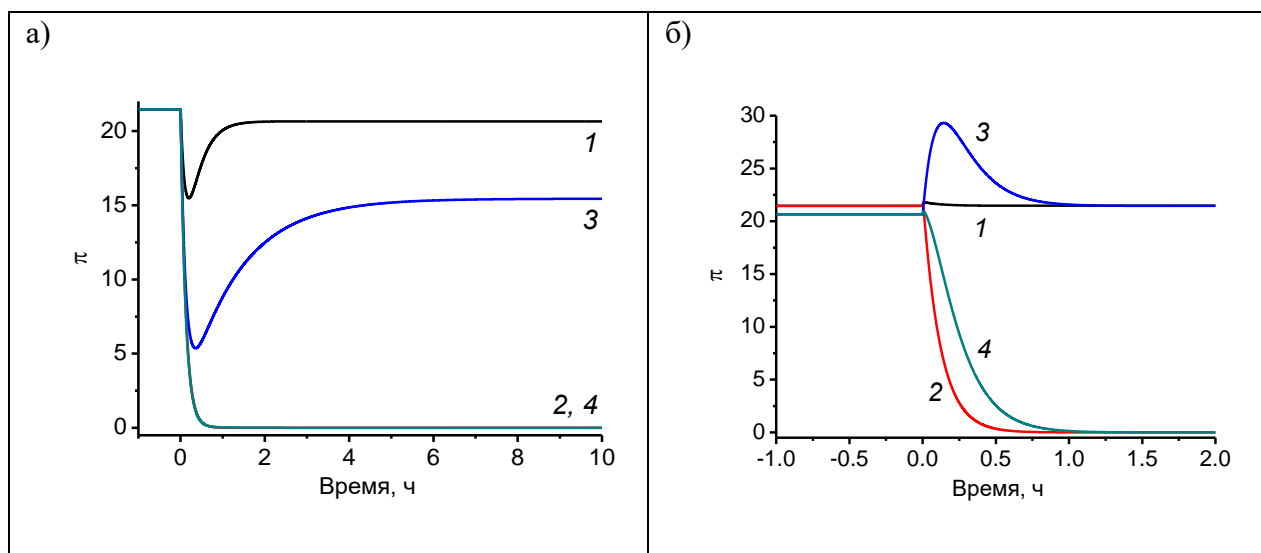


Рис. 6. (а) Влияние изменения концентрации ингибитора на специфический уровень продукта реакции (π). Концентрация арахидоновой кислоты – 10 мкМ. В момент времени $t = 0$ концентрация индометацина увеличилась с 0 до 2 мкМ (1, 2), с 0 до 20 мкМ (3, 4). (б) Влияние изменения концентрации субстрата на специфический уровень продукта реакции (π). Начальная концентрация арахидоновой кислоты – 10 мкМ, в момент времени $t = 0$ она увеличилась до 500 мкМ. Концентрация индометацина – 0 мкМ (1, 2), 2 мкМ (3, 4).

1, 3 – открытая система; 2, 4 – открытая система (до $t = 0$) и закрытая система (после $t = 0$). Специфический уровень продукта реакции равен отношению уровня продукта к стационарной концентрации фермента в открытой системе в отсутствие субстрата и ингибитора. Необходимые формулы и значения параметров приведены в [18].

Логично предположить, что для закрытой системы, при наличии инактивации и деградации фермента, концентрация фермента (как и скорость образования продукта реакции) во время наблюдения будет стремиться к нулю. Следовательно, с учётом преобразования Р в Р*, уровень продукта также будет стремиться к нулю. Это подтвердилось с помощью аналитического решения соответствующей системы уравнений [18].

Таким образом, если в системе с присутствием фермента (PGHS) и субстрата (AA), находящейся в стационарном состоянии, появляется ингибитор индометацин и одновременно прекращается синтез фермента, то эффект двухфазности исчезает (рис. 6а). Если же в системе резко возрастает концентрация субстрата и одновременно с этим прекращается синтез фермента, то в общем случае двухфазность сохраняется, но после быстрого роста уровня продукта происходит его падение до нуля (данные не приведены).

Однако бывают случаи, когда при резком возрастании концентрации субстрата эффект двухфазности для закрытой системы практически исчезает (рис. 6б). Это происходит тогда, когда начальная концентрация субстрата достаточно высока, и дальнейшее увеличение его концентрации практически не приводит к росту уровня продукта. Если в этом случае при $t = 0$ прекращается синтез фермента, то рост уровня продукта в результате изменения концентрации субстрата практически сразу же перекрывается падением этого уровня вследствие уменьшения концентрации фермента и скорости образования продукта. Если же в системе при этом находится некоторое количество обратимого ингибитора, то в открытой системе уровень продукта будет выше, чем в отсутствие ингибитора (эффект «депо», см. ранее в тексте), а в закрытой системе уровень продукта будет падать медленнее, чем в отсутствие ингибитора (рис. 6б). Для более высоких концентраций ингибитора начальный рост уровня продукта при резком увеличении концентрации субстрата становится заметнее, и эффект двухфазности

снова проявляется, т.к. в этом случае количество фермента, высвобождаемое из фермент-ингибиторных комплексов, будет выше (данные не приведены; также см. рис. 4).

Результаты, полученные в ходе моделирования, могут сыграть важную роль для дальнейших исследований НПВП *in vitro* и *in vivo*.

Работа выполнена с использованием оборудования, приобретенного за счет средств Программы развития Московского университета.

Список литературы

1. Ricciotti E., FitzGerald G.A. // *Arterioscler. Thromb. Vasc. Biol.* 2011. V. 31. P. 986–1000. doi 10.1161/ATVBAHA.110.207449
2. Hamberg M., Svensson J., Wakabayashi T., Samuelsson B. // *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 1974. V. 71. P. 345–349. doi: 10.1073/pnas.71.2.345
3. Hamberg M., Samuelsson B. // *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 1973. V. 70. P. 899–903. doi: 10.1073/pnas.70.3.899
4. Wu G., Vuletich J.L., Kulmacz R.J., Osawa Y., Tsai A.L. // *J. Biol. Chem.* 2001. V. 276. P. 19879–19888. doi: 10.1074/jbc.M100628200
5. Samuelsson B., Goldyne M., Granström E., Hamberg M., Hammarström S., Malmsten C. // *Annu. Rev. Biochem.* 1978. V. 47. P. 997–1029. doi: 10.1146/annurev.bi.47.070178.005025
6. Helliwell R.J., Adams L.F., Mitchell M.D. // *Prostaglandins Leukot. Essent. Fatty Acids.* 2004. V. 70. P. 101–113. doi: 10.1016/j.plefa.2003.04.002
7. Watanabe K., Yoshida R., Shimizu T., Hayaishi O. // *J. Biol. Chem.* 1985. V. 260. P. 7035–7041.
8. Vrzheschch P.V., Batanova E.A., Mevkh A.T., Varfolomeev S.D., Gazaryan I.G., Thorneley R. N. // *Biochem. J.* 2003. V. 372. P. 713–724. doi: 10.1042/BJ20030043
9. Smith W.L., Lands W.E. // *Biochemistry.* 1972. V. 11. P. 3276–3285. doi: 10.1021/bi00767a024
10. Egan R.W., Paxton J., Kuehl F.A. // *J. Biol. Chem.* 1976. V. 251. P. 7329–7335.
11. Мевх А.Т., Вржещ П.В., Шведас В.Ю.-К., Варфоломеев С.Д., Мяжкова Г.И., Якушева Л.А. // *Биоорган. химия.* 1981. Т. 7. С. 695-702. [Mevkh A.T., Vrzheschch P.V., Svedas V.Y.-K., Varfolomeev S.D., Myagkova G.I., Yakusheva L.A. // *Russ. J. Bioorg. Chem.* 1981. V. 7. P. 695-702.]
12. Vrzheschch P.V., Tsaplina L.A., Sakharova I.S. // *Biochemistry (Mosc.).* 2007. V. 72, P. 828–834. doi: 10.1134/s0006297907080032
13. Vane J.R. // *Nat. New Biol.* 1971. V. 231. P. 232–235. doi: 10.1038/newbio231232a0
14. Smith W.L., Meade E.A., DeWitt D.L. // *Ann. N. Y. Acad. Sci.* 1994. V. 714. P. 136–142. doi: 10.1111/j.1749-6632.1994.tb12037.x
15. Bacchi S., Palumbo P., Sponta A., Coppolino M.F. // *Antiinflamm. Antiallergy Agents Med. Chem.* 2012. V. 11. P. 52–64. doi 10.2174/187152312803476255

16. *Gabrielsson J., Peletier L.A.* // AAPS J. 2018. V. 20. P. 102. doi 10.1208/s12248-018-0256-z
17. *Westley A.M., Westley J.* // J. Biol. Chem. 1996. V. 271. P. 5347–5352. doi 10.1074/jbc.271.10.5347
18. *Krivoshey A.V., Efremov A.A., Matveishina E.K., Panova V.V., Vrzhesch P.V.* // Russ. J. Bioorg. Chem. 2021. V. 47. P. 1051-1059. doi 10.1134/S1068162021050289
19. *Кривошей А.В., Вржещ П.В.* // Труды 64-й Всероссийской научной конференции МФТИ. Биологическая и медицинская физика. 2021. С. 185-186.

Новые факты о биомембранах и их включение в разрабатываемую программу лекционного курса "Введение в науку о биомембранах"

Новиков К.Н.¹, Остроумов С.А.¹

*1 – Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова,
биологический факультет, г. Москва, Россия*

Аннотация

При разработке программы лекционного курса по теме "Введение в науку о биомембранах" целесообразно включить в программу освещение, в том числе, примеров последних результатов в исследовании биомембран с использованием наиболее современных биофизических методов. В статье показано, как новые данные о биомембранах и их компонентах можно использовать для модернизации лекций о биомембранах – в том числе, на примере результатов изучения оранжевого каротиноидного белка (ОСР, orange carotenoid protein) цианобактерий.

Ключевые слова: биомембраны, образование, вводный курс, модернизация, каротиноидные белки, оранжевый каротиноидный белок, цианобактерии, фотозащита.

Ранее были опубликованы материалы по разработке учебного курса по теме «Введение в науку о биомембранах» [1, 2]. Цель этой публикации – дополнить эти материалы предложениями включить в учебный курс некоторые новые факты, полученные при изучении биомембран.

Авторы предлагают включить факты в следующих областях изучения биомембран.

1. Липидный бислой биомембран экстремофильных бактерий – новые виды липидов, например, у термофилов.
2. Каротиноидные белки цианобактерий.
3. Родопсин-подобные белки бактерий и основанный на них новый тип фотосинтеза без хлорофилла.

Конкретизируем эти предложения на примере фактов, полученных при открытии и изучении каротиноидных белков цианобактерий.

Примером таких белков является оранжевый каротиноидный белок (orange carotenoid protein, ОСР). ОСР - представитель нового класса белков.

Белок ОСР был впервые описан в 1981 году Холтом и Кругманном [3], которые выделили его из одноклеточной цианобактерии *Arthrospira maxima* (Holt TK, Krogmann DW, 1981). Эта важная публикация озаглавлена кратко: "A carotenoid-protein from cyanobacteria" (в журнале *Biochimica et Biophysica Acta* (BBA) – Bioenergetics). Род *Arthrospira*, коммерчески известный как *Spirulina*, представлен нитчатыми цианобактериями с давней традицией употребления их в пищу. Вид *A. maxima* встречается в Центральной Америке.

В 2000 году было продемонстрировано, что цианобактерии могут осуществлять фотозащитное тушение флуоресценции независимо от фазовых переходов липидов, дифференциального трансмембранного рН и ингибиторов (El Bissati et al., 2000) [4]. Эта публикация озаглавлена "Photosystem II fluorescence quenching in the cyanobacterium *Synechocystis* PCC 6803: involvement of two different mechanisms" (тоже в журнале *Biochimica et Biophysica Acta* (BBA) – Bioenergetics). Цианобактерия *Synechocystis* PCC 6803 является одноклеточным организмом, способным расти и автотрофно, и гетеротрофно. Эта цианобактерия *Synechocystis* PCC 6803 - четвертый организм, геном которого был расшифрован. Это первый фототрофный организм, геном которого был полностью выявлен. Цианобактерия *Synechocystis* PCC 6803 – один из любимых модельных организмов для исследования различных вопросов биологии.

О кристаллической структуре ОСР было сообщено в 2003 году (Kerfeld et al., 2003) [5] в статье: "The Crystal Structure of a Cyanobacterial Water-Soluble Carotenoid Binding Protein" (в журнале *Structure*).

В изучение вопросов структуры и функции белка ОСР и связанного с ним молекулярного комплекса определен вклад внесли работы российских ученых (МГУ, РАН) и их соавторов из других научных учреждений (например, [6-12]). Новые научные результаты, полученные в этих работах, целесообразно отразить в вышеупомянутом лекционном курсе.

Некоторая информация о результатах работ российских ученых приведена в Таблице 1. Эти работы и публикации продолжаются. В таблице приведены только некоторые примеры этого большого цикла публикаций.

Таблица 1. Некоторые результаты изучения оранжевого каротиноидного белка (несколько примеров, selected).

Новые научные результаты	Ссылки	Номер ссылки в списке библиографии в этой статье
Выявленные новые факты о топологии белковых комплексов OCP-FRP предлагают механизм контроля высокой светостойчивости цианобактерий	Nikolai N. Sluchanko, Yury B. Slonimskiy, Evgeny A. Shirshin, Marcus Moldenhauer, Thomas Friedrich & Eugene G. Maksimov. OCP–FRP protein complex topologies suggest a mechanism for controlling high light tolerance in cyanobacteria // Nature Communications volume 9, Article number: 3869 (2018).	6
Выявлены и охарактеризованы этапы взаимодействия OCP-FRP в регуляции фотозащиты у цианобактерий, с использованием спектроскопии с временным разрешением. Пояснение аббревиатуры FRP: Фёрстеровский перенос энергии (<i>FRET</i> – Förster Resonance Energy Transfer) - a mechanism describing energy transfer between two light-sensitive molecules	Georgy V. Tsoraev, Antonina Bukhanko, Gleb S. Budylin, Evgeny A. Shirshin, Yury B. Slonimskiy, Nikolai N. Sluchanko, Miroslav Kloz, Dmitry A. Cherepanov, Yaroslava V. Shakina, Baosheng Ge, Marcus Moldenhauer, Thomas Friedrich, Maksym Golub, Jörg Pieper, Eugene G. Maksimov*, and Andrew B. Rubin. Stages of OCP-FRP Interactions in the Regulation of Photoprotection in Cyanobacteria, Part 1: Time-Resolved Spectroscopy // J. Phys. Chem. B 2023, 127, 9, 1890–1900.	7
Установлены новые факты о фотозащите цианобактерий.	Maksimov E.G., Protasova E.A., Sluchanko N.N., Li W.-J., Qin S.,	8

<p>Гибридное сопряжение r-фикоэритрина и оранжевого каротиноидного белка поддерживает основанный на FRET механизм фотозащиты цианобактерий. FRET – см. в этой таблице строку выше</p>	<p>Friedrich T., Ge B. Hybrid coupling of r-phycoerythrin and the orange carotenoid protein supports the FRET-based mechanism of cyanobacterial photoprotection // Biochemical and Biophysical Research Communications. 2019. T. 516. № 3. С. 699-704.</p>	
<p>Получены новые факты о белке восстановления флуоресценции: мощный, но малоизученный регулятор фотозащиты цианобактерий</p>	<p>Slonimskiy Y.B., Maksimov E.G., Sluchanko N.N. Fluorescence recovery protein: a powerful yet underexplored regulator of photoprotection in cyanobacteria // Photochemical & Photobiological Sciences. 2020. T. 19. № 6. С. 763-775.</p>	9
<p>Получены новые важные факты о светоконтролируемом переносе каротиноидов между водорастворимыми белками, связанный с фотозащитой цианобактерий</p>	<p>Slonimskiy Y.B., Maksimov E.G., Sluchanko N.N., Muzzopappa F., Wilson A., Kirilovsky D., Friedrich T. Light-controlled carotenoid transfer between water-soluble proteins related to cyanobacterial photoprotection // FEBS Journal. 2019. T. 286. № 10. С. 1908-1924.</p>	10
<p>Выполнено биофизическое моделирование процессов <i>in vitro</i> и <i>in vivo</i>, лежащих в основе регулируемого механизма фотозащиты цианобактерий</p>	<p>Shirshin E.A., Nikonova E.E., Kuzminov F.I., Fadeev V.V., Gorbunov M.Y., Sluchanko N.N., Elanskaya I.V., Maksimov E.G., Friedrich T. Biophysical modeling of <i>in vitro</i> and <i>in vivo</i> processes underlying regulated photoprotective mechanism in cyanobacteria // Photosynthesis</p>	11

	Research. 2017. Т. 133. № 1-3. С. 261-271.	
Охарактеризованы и проанализированы особенности белок-белковых взаимодействий в механизме фотозащиты цианобактерий	Sluchanko N.N., Slonimskiy Y.B., Maksimov E.G. Features of protein–protein interactions in the cyanobacterial photoprotection mechanism //Biochemistry (Moscow). 2017. Т. 82. № 13. С. 1592-1614.	12

Ниже даются комментарии о конкретных статьях, упомянутых в таблице 1.

Статья [6]. N.N. Sluchanko, Yu. B. Slonimskiy, E. A. Shirshin, M. Moldenhauer, T. Friedrich & E. G. Maksimov. OCP–FRP protein complex topologies suggest a mechanism for controlling high light tolerance in cyanobacteria // Nature Communications, volume 9, Article number: 3869 (2018). В статье авторы сообщают о выявлении новых фактов о топологии белковых комплексов OCP-FRP. Анализируя свои новые экспериментальные результаты, авторы выявляют новые детали механизма контроля высокой светостойчивости цианобактерий.

Статья [7]. G. V. Tsoraev, A. Bukhanko, G. S. Budylin, E. A. Shirshin, Yu. B. Slonimskiy, N. N. Sluchanko, M. Kloz, D. A. Cherepanov, Ya. V. Shakina, Baosheng Ge, M. Moldenhauer, T. Friedrich, M. Golub, J. Pieper, E. G. Maksimov*, and Andrew B. Rubin. Stages of OCP-FRP Interactions in the Regulation of Photoprotection in Cyanobacteria, Part 1: Time-Resolved Spectroscopy // J. Phys. Chem. B, 2023, 127, 9, 1890–1900. Авторы выявили новые факты об этапах взаимодействия OCP-FRP, важных для регуляции фотозащиты у цианобактерий. В этой работе использовалась современная и высокотехнологичная методология, а именно спектроскопия с временным разрешением. Пояснение аббревиатуры FRP: Фёрстеровский перенос энергии (FRET – Förster Resonance Energy Transfer) – перенос энергии по определенному механизму между двумя светочувствительными молекулами (mechanism describing energy transfer between two light-sensitive molecules).

Статья [8]. Maksimov E.G., Protasova E.A., Sluchanko N.N., Li W.-J., Qin S., Friedrich T., Ge B. Hybrid coupling of r-phycoerythrin and the orange carotenoid protein supports the FRET-based mechanism of cyanobacterial photoprotection // Biochemical and Biophysical Research Communications. 2019. Т. 516. № 3. С. 699-704. Авторы установили, что гибридное сочетание r-фикоэритрина и оранжевого каротиноидного белка создает основу для механизма фотозащиты цианобактерий, основанного на FRET. FRET – это Фёрстеровский перенос энергии (FRET – Förster Resonance Energy Transfer) - механизм, при котором энергия

переносится между двумя светочувствительными молекулами (a mechanism describing energy transfer between two light-sensitive molecules).

Статья [9]. Slonimskiy Y.B., Maksimov E.G., Sluchanko N.N. Fluorescence recovery protein: a powerful yet underexplored regulator of photoprotection in cyanobacteria // *Photochemical & Photobiological Sciences*. 2020. Т. 19. № 6. С. 763-775. В этой статье авторы выявили и проанализировали новые факты о белке восстановления флуоресценции (Fluorescence recovery protein), который они квалифицировали как мощный (но пока еще малоизученный) регулятор фотозащиты цианобактерий.

Статья [10]. Slonimskiy Y.B., Maksimov E.G., Sluchanko N.N., Muzzopappa F., Wilson A., Kirilovsky D., Friedrich T. Light-controlled carotenoid transfer between water-soluble proteins related to cyanobacterial photoprotection // *FEBS Journal*. 2019. Т. 286. № 10. С. 1908-1924. В этой работе авторы получили новые факты, которые показали возможность светоконтролируемого переноса каротиноидов между водорастворимыми белками, связанными с фотозащитой цианобактерий.

Статья [11]. Shirshin E.A., Nikonova E.E., Kuzminov F.I., Fadeev V.V., Gorbunov M.Y., Sluchanko N.N., Elanskaya I.V., Maksimov E.G., Friedrich T. Biophysical modeling of in vitro and in vivo processes underlying regulated photoprotective mechanism in cyanobacteria // *Photosynthesis Research*. 2017. Т. 133. № 1-3. С. 261-271. В этой работе авторы осуществили биофизическое моделирование процессов *in vitro* и *in vivo*, лежащих в основе регулируемого механизма фотозащиты цианобактерий.

Статья [12]. Sluchanko N.N., Slonimskiy Y.B., Maksimov E.G. Features of protein–protein interactions in the cyanobacterial photoprotection mechanism // *Biochemistry (Moscow)*. 2017. Т. 82. № 13. С. 1592-1614. В этой работе авторы выявили, охарактеризовали и проанализировали особенности белок-белковых взаимодействий в механизме фотозащиты цианобактерий.

Возникает вопрос о том, где - в каких частях лекционного курса - использовать новые знания в курсе лекций о биомембранах?

По мнению авторов, ответ: в двух местах курса.

Во-первых, в разделе, где рассказывается о мембранном аппарате цианобактерий, о фикобилисомах.

Во-вторых, в разделе об участии биомембран в регуляторных функциях биообъектов.

В раздел о мембранном аппарате цианобактерий целесообразно внести факты о фикобилисомах, в том числе использовать публикацию (Domínguez-Martín et al., 2022) в журнале *Nature* [13].

Освещение фикобилисом должно содержать информацию о строении и функционировании этих важных структур, связанных с мембранами цианобактерий.

Фикобилисо́мы — (от др.-греч. φῶκος — водоросли, лат. bilis — желчь и др.-греч. σῶμα - тело) светособирающие органеллы для фотосистемы II у цианобактерий, красных водорослей и глаукофитов.

Фикобилисомы — это белковые комплексы (вплоть до 600 полипептидов) полудисковидной или полусферической формы, прикрепленные к мембранам тилакоидов. Они состоят из большого количества хромофоровых белков — фикоболипротеинов — и объединенных с ними связующих белков. У каждой фикобилисомы есть ядро из аллофикоцианина, из которого выходят наружу стержни, состоящие из дисков фикоцианина и (если имеются) фикоэритринов или фикоэритроцианина. Пигменты располагаются в такой последовательности (начиная с кончиков стержней): фикоэритрин, затем фикоцианин, и затем аллофикоцианиновое ядро. В этом же порядке происходит транспорт энергии света, а далее к хлорофиллу а.

Для освещения вопросов взаимодействия оранжевого каротиноидного белка с фикобилисомами может быть полезным использовать данные вышеупомянутых публикаций, а также рисунок, приведенный в статье Зленко и др., 2014. [14] о молекулярной модели образования комплекса ОСР с фикобилисомой, в журнале «Компьютерные исследования и моделирование».

Для детализации учебного курса целесообразно использовать материалы, содержащиеся и в других новых публикациях по тематике курса, например, [15-20].

Выводы

В статье показано, как новые данные о биомембранах и их компонентах можно использовать для модернизации лекционного учебного курса «Введение в науку о биомембранах» – на примере результатов изучения выделенного и описанного в 1981 году оранжевого каротиноидного белка (ОСР, orange carotenoid protein) цианобактерий, некоторые аспекты функционирования которого были открыты после 2000 г. Даны примеры некоторых фактов, полученных в 2017-2024.

Библиография

1. Ostroumov S.A., Kotelevtsev S.V. Educational program. A new lecture course entitled: introduction to biomembrane science. <https://www.academia.edu/44040565/>; p. 1-9, last viewed 22.07.2024.

2. Ostroumov S.A., Kotelevtsev S.V. About a new lecture course entitled: Introduction to biomembrane science // Ecological Studies, Hazards, Solutions. 2021, Volume 27, p.26-31. <https://istina.msu.ru/publications/article/360669809/>.
3. Holt TK, Krogmann DW (1981). "A carotenoid-protein from cyanobacteria". *Biochimica et Biophysica Acta (BBA) - Bioenergetics*. 637 (3): 408–414.
4. El Bissati K, Delphin E, Murata N, Etienne A, Kirilovsky D (April 2000). "Photosystem II fluorescence quenching in the cyanobacterium *Synechocystis* PCC 6803: involvement of two different mechanisms". *Biochimica et Biophysica Acta (BBA) - Bioenergetics*. 1457 (3): 229–242.
5. Kerfeld CA, Sawaya MR, Brahmamdam V, Cascio D, Ho KK, Trevithick-Sutton CC, et al. (January 2003). "The Crystal Structure of a Cyanobacterial Water-Soluble Carotenoid Binding Protein". *Structure*. 11 (1): 55–65.
6. Nikolai N. Sluchanko, Yury B. Slonimskiy, Evgeny A. Shirshin, Marcus Moldenhauer, Thomas Friedrich & Eugene G. Maksimov. OCP–FRP protein complex topologies suggest a mechanism for controlling high light tolerance in cyanobacteria // *Nature Communications* volume 9, Article number: 3869 (2018).
7. G. V. Tsoraev, A. Bukhanko, G S. Budylin, E.A. Shirshin, Yu. B. Slonimskiy, N. N. Sluchanko, M. Kloz, D. A. Cherepanov, Ya.V. Shakina, Baosheng Ge, Marcus Moldenhauer, T. Friedrich, M. Golub, Jörg Pieper, E. G. Maksimov*, and A. B. Rubin. Stages of OCP-FRP Interactions in the Regulation of Photoprotection in Cyanobacteria, Part 1: Time-Resolved Spectroscopy // *J. Phys. Chem. B*, 2023, 127, 9, 1890–1900.
8. Maksimov E.G., Protasova E.A., Sluchanko N.N., Li W.-J., Qin S., Friedrich T., Ge B. Hybrid coupling of r-phycoerythrin and the orange carotenoid protein supports the FRET-based mechanism of cyanobacterial photoprotection // *Biochemical and Biophysical Research Communications*. 2019. T. 516. № 3. C. 699-704.
9. Slonimskiy Y.B., Maksimov E.G., Sluchanko N.N. Fluorescence recovery protein: a powerful yet underexplored regulator of photoprotection in cyanobacteria // *Photochemical & Photobiological Sciences*. 2020. T. 19. № 6. C. 763-775.
10. Slonimskiy Y.B., Maksimov E.G., Sluchanko N.N., Muzzopappa F., Wilson A., Kirilovsky D., Friedrich T. Light-controlled carotenoid transfer between water-soluble proteins related to cyanobacterial photoprotection // *FEBS Journal*. 2019. T. 286. № 10. C. 1908-1924.
11. Shirshin E.A., Nikonova E.E., Kuzminov F.I., Fadeev V.V., Gorbunov M.Y., Sluchanko N.N., Elanskaya I.V., Maksimov E.G., Friedrich T. Biophysical modeling of in vitro and in vivo processes underlying regulated photoprotective mechanism in cyanobacteria // *Photosynthesis Research*. 2017. T. 133. № 1-3. C. 261-271.
12. Sluchanko N.N., Slonimskiy Y.B., Maksimov E.G. Features of protein–protein interactions in the cyanobacterial photoprotection mechanism // *Biochemistry (Moscow)*. 2017. T. 82. № 13. C. 1592-1614.
13. Domínguez-Martín, M.A., Sauer, P.V., Kirst, H., Sutter, M., Bina, D., Greber, B.J., Nogales, E., Polívka, T. and Kerfeld, C.A., 2022. Structures of a phycobilisome in light-harvesting and photoprotected states. *Nature*, 609(7928), pp.835-845.

14. Зленко, Д.В., Стадничук, И.Н. and Красильников, П.М., 2014. Молекулярная модель образования комплекса ОСР с фикобилисомой. // Компьютерные исследования и моделирование, 6(5), pp.761-774.
15. Selivanovitch, E., Ostwalt, A., Chao, Z. and Daniel, S., 2024. Emerging Designs and Applications for Biomembrane Biosensors. *Annual Review of Analytical Chemistry*, 17(1), pp.339-366.
16. Deserno, M., 2024. Biomembranes balance many types of leaflet asymmetries. *Current Opinion in Structural Biology*, 87, p.102832.
17. Qureshi, S.A., Rafiqa, K., Awasthi, S., Jain, A., Nadaf, A., Hasan, N., Kesharwani, P. and Ahmad, F.J., 2024. Biomembrane camouflaged nanoparticles: a paradigm shifts in targeted drug delivery system. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, p.113893.
18. Zhang, X., Zhang, M., Cui, H., Zhang, T., Wu, L., Xu, C., Yin, C. and Gao, J., 2024. Autophagy -modulating biomembrane nanostructures: A robust anticancer weapon by modulating the inner and outer cancer environment. *Journal of Controlled Release*, 366, pp.85-103.
19. Jiang, X., Wu, L., Zhang, M., Zhang, T., Chen, C. and Gao, J., 2024. Biomembrane-based nanoparticles for cancer immunotherapy. *Nanomedicine in Cancer Immunotherapy*, pp.299-316.
20. Osiewacz, H.D., 2024. The impact of biomembranes and their dynamics on organismic aging: insights from a fungal aging model. *Frontiers in Aging*, 5, p.1356697.

Учение В.И. Вернадского о биосфере и его роль для фундаментальной биологии и биотехнологии

Остроумов С.А.¹, Матишов Г.Г.², Жиров В.К.³, Ивантер Э.В.⁴,
Криксунов Е.А.¹, Розенберг Г.С.⁵, Садчиков А.П.^{1,6,7}

¹ *Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова,
биологический факультет, г. Москва, Россия*

² *Южный научный центр РАН, г. Ростов-на-Дону, Россия*

³ *Кольский научный центр РАН, г. Апатиты, Россия*

⁴ *Петрозаводский государственный университет, г. Петрозаводск, Россия*

⁵ *Институт экологии Волжского бассейна, г. Тольятти, Россия*

⁶ *Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова,
Международный учебно-научный биотехнологический центр, г. Москва, Россия*

⁷ *Московское общество испытателей природы, г. Москва, Россия*

В.И. Вернадский (1863–1945) в своих трудах разработал ряд новых представлений о сложной, динамичной и закономерным образом организованной природной системе, которую называют биосферой. Он наполнил этот ранее существовавший термин глубоким и новым содержанием. Последующие поколения ученых продолжают разработку многих фундаментальных вопросов, сформулированных или продвинутых в трудах В.И. Вернадского. Цель данной публикации – еще раз вернуться к рассмотрению ряда фундаментальных положений и концепций В.И. Вернадского с учетом тех формулировок, которые были даны в его публикациях, и обратить внимание на их роль для развития некоторых существенных научных вопросов в контексте современных исследований.

Ключевые слова: биосфера, живое вещество, миграция химических элементов, окружающая среда, антропогенные воздействия, биология, биотехнология

1. Введение

Среди наиболее известных работ В.И. Вернадского (1863–1945) - книга «Биосфера» [1, 2]. В этой книге и последующих публикациях В.И. Вернадский неоднократно формулировал свои концепции, приводил их обоснование и анализировал связи между ними [1-4].

Рассмотрим некоторые из важнейших концепций, находящиеся в центре внимания публикаций В.И. Вернадского, в том числе следующие концепции: 1) биосфера; 2) живое вещество как фактор изменения лика Земли; 3) биогенная миграция атомов химических элементов; 4) биогеохимические принципы; 5) роль человека как фактора воздействия на

биосферу. Заранее отметим, что авторы не ставят своей целью сделать обзор работ В.И. Вернадского и последующих исследователей. Существенные аспекты учения В.И. Вернадского о биосфере были рассмотрены в публикациях [5-40]. Данная работа основана на предыдущих публикациях авторов по вопросам, связанным с биосферой и биогеохимией.

2. Биосфера

Сам термин «биосфера», как известно, существовал до В.И. Вернадского. Он освещал в своих трудах генезис и эволюцию содержания этого термина. В.И. Вернадский писал: «Понятие «биосферы», т. е. «области жизни», введено было в биологию Ламарком (1744–1829) в Париже в начале XIX в., а в геологию Э. Зюссом (1831–1914) в Вене в конце того же века. В нашем столетии биосфера получает совершенно новое понимание» [3, с. 324]. В другом месте В.И. Вернадский пишет о вкладе и других исследователей: «...выявилось ясное представление о биосфере – области жизни, охватывающей атмосферу, гидросферу и сушу, высказанное впервые, мне кажется, Вик д-Азиром, крупным врачом и биологом» [3, с. 106]. В этом месте В.И. Вернадский дает ссылку на публикацию этого автора (F. Vicq d'Azyr), датированную 1786 годом. В своей инновационной интерпретации термина биосфера В.И. Вернадский делает акцент на особую роль живого вещества в изменении лица Земли и роль биогенной миграции химических элементов. Благодаря работам В.И. Вернадского термин «биосфера» стал одним из фундаментально важных терминов биологии.

3. Живое вещество и его роль в формировании лица Земли

В.И. Вернадский считал, что в формировании его представлений очень большую роль сыграли его размышления о живом веществе. Он писал: «Вещество биосферы резко и глубоко неоднородно» [3, с. 127]. И далее: «Живое вещество охватывает и перестраивает все химические процессы биосферы, действенная его энергия, по сравнению с энергией косного вещества, уже в историческом времени огромна. Живое вещество есть самая мощная геологическая сила, растущая с ходом времени. Оно живет не случайно и независимо от биосферы, но есть закономерное проявление физикохимической ее организованности. Его образование и существование есть ее главная геологическая функция» [3, с. 127]. Эти слова до сих пор звучат свежо и дают пищу для ума современных исследователей [5-38]. Приходится признать, что даже после В.И. Вернадского, после признания триумфа его идей, далеко не все ученые смогли воспринять мысли В.И. Вернадского о роли живого вещества. Даже среди

крупных геологов, живших позднее, было недопонимание этого важного тезиса о роли живого вещества и о явлениях жизни некоторые геологи писали, как о факторе, просто «осложняющем» некие геологические закономерности. Вместе с тем идеи В.И. Вернадского о роли живого вещества оказали существенное влияние на исследования в области биологии, поскольку акцентировали большую роль живых организмов в потоках вещества и переносе конкретных химических элементов, в биогеохимии и биосфере в целом.

4. Миграция атомов химических элементов

В трудах В.И. Вернадского многократно встречается выражение, ставшее фиксированным термином в его теории биосферы: «биогенная миграция атомов». Вернадский рассматривал многие биологические феномены (эволюцию, метаболизм, физиологические функции организмов) как форму проявления биогенной миграции атомов.

В.И. Вернадский связывал сущность жизни с активизацией миграции атомов химических элементов. Поэтому он почти всегда предварял выражение «миграция атомов» прилагательным «биогенная».

Надо признать, что выражение «биогенная миграция атомов» полюбилось последующим исследователям в области геохимии и биогеохимии. В некоторых современных публикациях выражение «биогенная миграция элементов» встречалось более десяти раз на одной странице.

Обсуждение вопроса о влиянии живых организмов на миграцию атомов химических элементов проведено в некоторых других публикациях [27, 30, 32, 35, 37, 38]. Ряд химических элементов привлекают внимание как токсичные загрязнители современной окружающей среды, поэтому вопросы миграции химических элементов сейчас приобретают дополнительное значение в связи с разработкой технологий и биотехнологий удаления этих элементов из компонентов окружающей среды.

5. Биогеохимические принципы

В.И. Вернадский сформулировал три биогеохимических принципа. В формулировках этих принципов используется вышеупомянутый термин «биогенная миграция атомов».

Первый принцип. «Биогенная миграция атомов химических элементов в биосфере всегда стремится к максимальному своему проявлению» [3, с. 283].

Второй принцип. «Эволюция видов в ходе геологического времени, приводящая к созданию форм жизни, устойчивых в биосфере, идет в направлении, увеличивающем биогенную миграцию атомов биосферы» [3, с. 283].

В качестве третьего принципа В.И. Вернадский предложил следующее положение: «... в течение всего геологического времени... заселение планеты должно было быть максимально возможным для всего живого вещества, которое тогда существовало» [3, с. 286]. Интересно, что обсуждение этого принципа В.И. Вернадский проводил в тесной связи с обсуждением и цитированием им работ Ч. Дарвина. О его работе «Происхождение видов путем естественного отбора» (1859) В.И. Вернадский писал, как о «книге, перевернувшей научную жизнь человечества» [3, с. 287]. Биогеохимические принципы Вернадского продолжают глубоко интересовать современных исследователей. О некоторых разработках в продолжение этой линии в научном анализе явлений и процессов в биосфере написано в работах [30, 32, 35, 36-38].

6. Человек как фактор воздействия на биосферу

В.И. Вернадский в своих работах, написанных во второй половине его жизни, включил в свой анализ биосферы ту роль, которую стал играть человек. Он писал: «Человек... изменяет лик планеты, создает бесчисленное множество новых в истории биосферы физико-химических процессов... [3, с. 247].

Во время жизни Вернадского еще практически не использовалось выражение «антропогенные воздействия», ставшее популярным в научной и публицистической лексике значительно позже. Но В.И. Вернадский фактически предвидел грядущий драматизм во взаимодействии человека и биосферы. Вышецитированная фраза Вернадского продолжалась так: «...человек... меняет характер биосферы... пока действует более-менее бессознательно». Необходимо учитывать особенности лексики Вернадского. Он сознательно смягчил свою формулировку. Интересно, как продолжил свой текст В.И. Вернадский после вышеуказанной фразы. Он написал: «В ноосфере урегулирование этой функции человека должно явиться одной из основных черт ее будущей структуры» [3, с. 247]. Как мы хорошо знаем, пока еще ситуация очень далека от того, что Вернадским названо «урегулированием» [3].

Более детальное обсуждение важных теоретических положений в учении Вернадского о биосфере и некоторые попытки использования новых фактов, полученных в современных исследованиях (например, в работах [5–22]), для анализа поставленных В.И. Вернадским вопросов, сделаны в ряде публикаций [23–25, 27, 29, 30–39]. Современное антропогенное воздействие на биосферу нарастает и усложняется. Дополнительным компонентом

антропогенного воздействия становится деятельность человека по использованию технологии и биотехнологии для детоксикации или локального очищения компонентов окружающей среды (например, [40]).

7. Заключение

В заключение отметим следующее. Учение Вернадского о биосфере сыграло существенную роль в развитии всего комплекса наук, связанных с изучением природных комплексов, включающих как биоту, так и абиотические компоненты. В биологии значительно активизировались исследования, касающиеся роли живых организмов как компонентов экосистем и биосферы в целом.

В.И. Вернадский сформулировал важнейшие концептуальные положения и предвосхитил дальнейшее развитие исследований, которые в наше время получили название наук об окружающей среде. Во времена Вернадского самого этого термина «окружающая среда» (environment) в его современном понимании с его громогласностью и приоритетностью как ключевого слова – не существовало. Вернадский своим учением о биосфере предвосхитил появление важнейшей области современной науки – наук об окружающей среде (environmental sciences). Эти науки граничат и частично пересекаются с биологией и существенно влияют на тематику биологических исследований. Формируются тесные взаимосвязи и взаимоотношения между науками об окружающей среде и экологией, которое длительное время была одной из областей в рамках комплекса биологических наук. По-видимому, граница между науками об окружающей среде и экологией сейчас трудноразличима.

В развитии биотехнологии существенное место занимает экологическая биотехнология, связанная с разработкой биологически и экологически ориентированных способов и технологий борьбы с загрязнением среды, биотехнологий очищения ее компонентов (например, [40]). Актуальность достижения прогресса в области средоулучшающих технологий будет еще более увеличиваться со временем. Есть основания надеяться, что исследования природных процессов и механизмов в биосфере, которые вносят вклад в детоксикацию биосферы, очищение среды, поддержание качества воды будут способствовать прогрессу в области экологической биотехнологии. Дальнейшее развитие, углубление, детализация идей В.И. Вернадского, заложенных в его учении о биосфере, как можно надеяться, будет способствовать дальнейшей разработке этого важного направления биотехнологии.

Благодарность

Авторы благодарят многих сотрудников РАН и МГУ за обсуждение проблем геохимии и биогеохимии.

Список литературы

1. Вернадский В.И. Биосфера. Ленинград: издательство НХТИ, 1926. 146 с.
2. Вернадский В.И. Биосфера. Мысли и наброски. М.: Издательский дом Ноосфера, 2001. 244 с.
3. Вернадский В.И. Химическое строение биосферы Земли и ее окружения. М.: Наука, 1965. 374 с.
4. Вернадский В.И. Научная мысль как планетное явление. М.: Наука, 1991. 272 с.
5. Добровольский Г.В. К 80-летию выхода в свет книги В.И. Вернадского “Биосфера”. Развитие некоторых важных разделов учения о биосфере // Экологическая химия, 2007. Том 16. № 3. С.135–143.
6. Ермаков В.В. Флуориметрическое определение селена в продуктах животноводства, органах (тканях) животных и объектах окружающей среды // Методические указания по определению пестицидов в биологических объектах. М.: ВАСХНИЛ, 1985. С. 28–35.
7. Ермаков В.В. Биогеохимические провинции: концепция, классификация и экологическая оценка // Основные направления геохимии. М.: Наука, 1995. С.183–196.
8. Ермаков В.В. Геохимическая экология как следствие системного изучения биосферы. // Тр. биогеохим. Лаб., 1999. Том 23. С. 152–158.
9. Ермаков В.В. Биогеохимическая эволюция таксонов биосферы в условиях техногенеза // Техногенез и биогеохимическая эволюция таксонов биосферы (Technogenesis and biogeochemical evolution of the biospheric taxons). М.: Наука, 2003. С. 5–22.
10. Ермаков В.В. Геохимическая экология и биогеохимические критерии оценки экологического состояния таксонов биосферы // Геохимия, 2015. № 3. С. 203–221.
11. Ермаков В.В., Карпова Е.А., Корж В.Д., Остроумов С.А. Инновационные аспекты биогеохимии. М.: ГЕОХИ, 2012. 346 с. <https://5bio5.blogspot.com/2019/08/23-1.html>
12. Ермаков В.В., Ковальский В.В. Биологическое значение селена. М.: Наука, 1974. 298 с.
13. Ермаков В.В., Петрунина Н.С., Карпова Е.А. Эколого-биогеохимические исследования условно-фоновой территории // Новые идеи в науках о Земле, 1974. № 5. С. 5–6.
14. Ермаков В.В., Петрунина Н.С., Тютиков С.Ф., Данилова В.Н., Хушвахтова С.Д., Дегтярев А.П., Кречетова Е.В. Концентрирование металлов растениями рода *Salix* и их значение при выявлении кадмиевых аномалий // Геохимия, 2015. № 11. С. 978–978.

15. Ермаков В.В., Сарьян В.К. Развитие исследований по применению новых информационных технологий в экологическом мониторинге и биогеохимии // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники, 2018. Том 21. № 3. С. 129–134.
16. Ермаков В.В., Тютиков С.Ф. Геохимическая экология животных. Москва: Наука, 2008. 312 с.
17. Ермаков В.В., Тютиков С.Ф., Хушвахтова С.Д., Данилова В.Н., Боев В.А., Барабанщикова Л.Н., Чудинова Е.А. Особенности количественного определения селена в биоматериалах // Вестник Тюменского государственного университета. Экология и природопользование, 2010. № 3. С. 206–214.
18. Лубкова Т.Н., Пухов В.В., Шестакова Т.В., Тропин И.В., Котелевцев С.В., Остроумов С.А. Изучение взаимодействия некоторых химических элементов с водорослями: проверка способности к биосорбции // Самарская Лука: проблемы региональной и глобальной экологии, 2015. Том 24. № 4. С. 25–31.
19. Остроумов С.А. О функциях живого вещества в биосфере // Вестник Российской академии наук, 2003. Том 73. № 3. С. 232–238. <https://www.academia.edu/44001275/>
20. Остроумов С.А. Поиск подходов к решению проблемы глобальных изменений: элементы теории биотическо-экосистемного механизма регуляции и стабилизации параметров биосферы, геохимической и геологической среды // Вестник Московского университета. Серия 16. Биология, 2005. № 1. С. 24. <https://www.academia.edu/44366143/>
21. Остроумов С.А. Химико-биотические взаимодействия и новое в учении о биосфере В.И. Вернадского. М.: Макс-пресс, 2009. 92 с. <https://www.academia.edu/1124807/>
22. Остроумов С. Биологические фильтраторы – важная часть биосферы // Наука в России, 2009. № 2. С. 30–36. <https://www.academia.edu/87676753/>
23. Остроумов С.А. Новая типология вещества и роль ex-living matter (ELM) в биосфере [New typology of matter and the role of ex-living matter (ELM)] // Ecological Studies, Hazards, Solutions, 2010. Vol.16. P. 62–65.
24. Остроумов С.А. Роль организмов в регуляции миграции химических элементов и перемещений вещества в экосистемах // Экология промышленного производства, 2010. № 3. С. 26–31. <https://www.academia.edu/58561062/>
25. Остроумов С.А. О типологии основных видов вещества в биосфере // Экологическая химия, 2011. Том 20. № 3. С. 179–188. <https://www.academia.edu/44001142/>
26. Остроумов С.А. Некоторые вопросы химико-биотических взаимодействий и новое в учении о биосфере // Ecol. Studies, Hazards, Solutions, 2011. Vol.17. P. 1–20; <https://www.researchgate.net/publication/273574855>
27. Остроумов С.А. Биотическая регуляция миграции химических элементов: выявление принципов // Экологическая химия, 2011. Том 20. № 1. С.43–50. <https://istina.msu.ru/publications/article/586444/>

28. Остроумов С.А. Изучение вопросов химико-биотических взаимодействий в биосфере // Самарская Лука: проблемы региональной и глобальной экологии, 2012. Том 21. № 4. С. 5–19. <https://www.academia.edu/27074304/>
29. Остроумов С.А. Современное развитие некоторых идей В.И. Вернадского // Известия Самарского научного центра Российской академии наук, 2013. Том 15. № 3. С. 17–22; <https://www.researchgate.net/publication/269088415>
30. Остроумов С.А. Четвертый и пятый биогеохимические принципы // Успехи наук о жизни, 2013. № 6. С. 69–71. <https://www.academia.edu/88097631/>
31. Остроумов С.А. Детализация концепций В.И. Вернадского о роли живого вещества в биогеохимии биосферы // Биогеохимия техногенеза и современные проблемы геохимической экологии, 2015. Том 1. С. 30–32. <https://www.academia.edu/122143291/>
32. Остроумов С.А. Развитие наук о биосфере и геохимическая среда: четвертый биогеохимический принцип // Экологические и биологические системы. 2015. С. 161–165. <https://istina.msu.ru/publications/article/12272485/>
33. Остроумов С.А. Изучение биосферы и химико-биотические взаимодействия. Москва: МАКС-Пресс, 2016. 28 с. ISBN 978-5-317-05302-4. <https://istina.msu.ru/publications/book/22229905/>
34. Остроумов С.А. Новые аспекты роли организмов и детрита в детоксицирующей системе биосферы // Экологическая химия, 2017. Том 26. № 3. С. 165–174. <https://www.academia.edu/44001210/>; <https://istina.msu.ru/publications/article/28295222/>
35. Остроумов С.А. О роли биоты и биогенного вещества в биосфере. Четвертый биогеохимический принцип // Биогеохимия – научная основа устойчивого развития и сохранения здоровья человека. Тула: ТГУ, 2019. Том 1. С. 61–63. <https://www.academia.edu/44499784/>
36. Остроумов С.А. О функциональной биосферной роли живого и биогенного вещества. Четвертый биогеохимический принцип // Экологическая химия, 2019. Том 28. № 4. С. 211–215. <https://istina.msu.ru/publications/article/215617588/>
37. Остроумов С.А. В.И. Вернадский и разработка фундаментальных концепций в теории биосферы. // Biogeochemical innovations under the conditions of the biosphere technogenesis correction, 2020, Vol.1, pp. 38-43.
38. Остроумов С.А., Колесов Г.М. Редкие и рассеянные элементы в биогенном детрите: новая сторона роли организмов в биогенной миграции элементов // Известия Самарского научного центра Российской академии наук, 2010. Том 12. № 1. С. 153–155. <https://www.academia.edu/74226531/>
39. Campbell, M.O.N., 2024. Biogeochemistry and the Environment. Springer.
40. Inomjon, B., Sevara, J. and Gulnoza, S., 2024. Bioremediation of contaminated soils using tall plants. //Innovations in Technology and Science Education, 3(19), pp.96-104.

Биотестирование мембранотропных экотоксикантов

Остроумов С.А.¹, Цай С. (Cai Xiang)¹

¹ *Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова,
биологический факультет, г. Москва, Россия*

Аннотация. В статье продолжены работы МГУ по оценке экологической опасности новых видов загрязнения окружающей среды, в том числе смешиваемыми химическими веществами, содержащими синтетические поверхностно-активные вещества (ПАВ), которые являются мембранотропными веществами. Проведено биотестирование химической композиции, содержащей ПАВ, на проростках растений. Выявлена токсичность для этих тест-объектов производимого в КНР пеномощного смешиваемого вещества, а именно Ginger Polygonum Multiflorum Nutrient Shampoo (GPMNS). Наличие в составе этого смешиваемого химического продукта экстрактов лекарственных растений не оказывало нейтрализующего воздействия на проявление токсичности (фитотоксичности).

Ключевые слова: загрязнение среды, оценка экологической опасности, синтетические ПАВ, смешиваемые вещества, биотестирование, проростки растений.

Вступление

Химическое загрязнение среды делает актуальной количественной оценки токсичности и экологической опасности веществ, попадающих в биосферу. Среди этих веществ – детергенты и синтетические поверхностно-активные вещества (ПАВ) [1-3]. Для изучения токсичности химических поллютантов используют многие виды биотестирования, в том числе фитотесты ([4] и др.).

В предыдущих публикациях даны результаты биотестирования синтетических ПАВ и ПАВ-содержащих химических продуктов, смесей и препаратов – а именно, были обнаружены факты об их токсичности (публикации С.А. Остроумова и соавторов [4-7], а также [9-15]). В этих работах были установлены концентрации детергентов (моющих средств) и ПАВ в воде, оказавшие токсическое воздействие на различные биологические виды.

Необходимо отметить, что ПАВ и детергенты являются мембранотропными химическими экотоксикантами. Молекулярный механизм их биологического действия включает взаимодействие с биологическими мембранами [11, 13].

Целью данной работы была проверка нашей гипотезы, что шампунь GPMNS может оказывать токсическое действие на высшее растение *Vigna radiata*.

1. Материалы и методы

Химический продукт, который был протестирован в этой работе - китайский травяной шампунь, а именно, шампунь Ginger Polygonum Multiflorum Nutrient Shampoo, (GPMNS) производится компанией BAWANG International (Group) Holding Co., Ltd (Гуанчжоу, Китай). Это непрозрачный жидкий шампунь коричневого цвета. В состав шампуня входят: лаурилполиэфир сульфат аммония, лаурилсульфат аммония, кокамидопропилбетаин, кокамид МЭА, гликоль дистеарат, ПДМС (полидиметилсилоксан), ароматизатор, хлорид натрия, пироктоноламин, поликватерний-47, поликватерний-10, гидантоин DMDM, пантенол, ЭДТА-Na₂, метилпарабен, экстракт имбиря (разновидность экстракта корней имбиря), *Polygonum multiflorum* (входит в состав китайского лекарства) и вода.

Методика подробно описана в монографиях [11, 13] и наших статьях [10, 11]. Семена помещали в чашки Петри. Добавляли водные растворы исследуемого химического вещества. После прорастания семян количественные параметры проростков измеряли и рассчитывали средние значения и стандартные ошибки. Статистический анализ данных проводился с использованием Программы Microsoft Excel 2019.

Количество семян, помещаемых в чашку Петри - 30. Для каждой концентрации было три чашки Петри, в каждой по 30 семян. В результате каждая концентрация была протестирована, используя суммарно 90 семян. Объем добавленного раствора шампуня в каждую чашку Петри был 20 мл. Изометрический объем (20 мл) сверхчистой воды использовался в качестве контроля. Сверхчистая вода была получена с помощью системы очистки воды Heal Force (Canrex Analytic Instrument Co., Ltd, Шанхай, Китай). Температура инкубации чашек Петри составляла $25,0 \pm 1,0$ °C.

При обработке результатов использовали расчеты двух индексов. Эти индексы - индекс всхожести семян (SGI) и индекс длины корней (RLI), - иллюстрируют степень фитотоксичности. Формулы для их расчета даны Mtisi et al. в статье [8].

На основании опубликованных эмпирических значений оценка риска [8], фитотоксичность во многих случаях можно классифицировать в соответствии с четырьмя классами, такими как: (1) слабая (slight) фитотоксичность ($-0,25 \leq \text{SGI}$ или $\text{RLI} < 0$), (2) умеренная (moderate) фитотоксичность ($-0,5 \leq \text{SGI}$ или $\text{RLI} < -0,25$), (3) высокая (high) фитотоксичность ($-0,75 \leq \text{SGI}$ или $\text{RLI} < -0,5$), и (4) крайне высокая, экстремальная (extreme)

фитотоксичность ($-1 \leq \text{SGI}$ или $\text{RLI} < -0,75$). Эта классификация представляется полезной, но ее не следует абсолютизировать.

Другие детали методики экспериментов описаны в [11, 13].

2. Результаты и обсуждение

Полученные результаты (для инкубации в течение 48 часов) представлены в таблице 1. В таблице 1 представлены значения средней длины корней проростков после 48-часовой инкубации (выдержки), а также стандартные ошибки.

Из таблицы 1 видно, что повышение концентрации исследуемого химического вещества (GPMNS) приводило к повышению токсичности для используемого биологического вида, а именно *Vigna radiata*. Повышение концентрации вызвало снижение длины корней. Интерпретация полученных данных представлена в таблице 2.

Полученные результаты согласуются с предыдущими результатами исследований, проведенных С.А. Остроумовым с соавторами в МГУ [4-7, 9-15].

Таблица 1. Результаты теста на проростках растений (*Vigna radiata*) при 48-часовом воздействии различных концентраций водного раствора китайского травяного шампуня (а именно, GPMNS, 20 мл) при $25,0 \pm 1,0$ °С.

Концентрация (%)	0,0% (контроль)	0,1%	0,5%	1,0%	5,0%
Средняя длина корней (мм)	19,68	22,63	13,51	7,15	0,27
Стандартная ошибка	0,64	0,92	0,80	0,61	0,13
Индекс SGI (прорастание семян)	0,00	-0,01	-0,04	-0,16	-0,93

Индекс RLI (длина корней)	0,00	0,15	-0,31	-0,64	-0,99
---------------------------------	------	------	-------	-------	-------

Примечание к таблице 1. Количество проростков, длина корней которых была задействована в расчете для вычисления среднего значения длины корней составило: n = 89 для 0,0% (контроль); n = 88 для 0,1% раствора шампуня, n = 85 для 0,5%, и n = 75 для 1,0, n = 6 при 5,0% растворе шампуня.

Таблица 2. Интерпретация данных, полученных в наших опытах после инкубации проростков *Vigna radiata* при различных концентрациях тестируемого химического продукта, а именно смесового химического вещества GPMNS.

Концентрация (%) GPMNS	Интерпретация результатов фитотеста в этом исследовании	Комментарии
0	Нет токсичности	Нет подавления роста
0,1	Отсутствие значимого токсического эффекта, либо незначительный токсический эффект, либо легкая стимуляция	Отсутствие значительного подавления роста
0,5	Выраженная токсичность	Подавление роста почти на 50% (за 48 часов ингибирование составляет несколько менее 50%)
1.0	Сильная токсичность (высокая фитотоксичность)	Торможение роста более чем 50% (за 48 часов)
5.0	Смертельный (летальный) эффект (крайне высокая фитотоксичность)	Рост корней практически отсутствует

Примеры ПАВ-содержащих химических продуктов, для которых была выявлена фитотоксичность, приведены в Таблице 3.

Таблица 3. Некоторые химические продукты, содержащие ПАВ, для которых установлена фитотоксичность при биотестировании на проростках растений.

Химические продукты (смесевые композиции, содержащие ПАВ)	Ссылки
Жидкий детергент "Вильва" (при действии на проростки <i>Fagopyrum esculentum</i> и <i>Oryza sativa</i>)	[15]
Порошковые детергенты	[11, 13]
Жидкие детергенты (Laundry detergents)	Новые данные авторов этой статьи
Ginger Polygonum Multiflorum Nutrient Shampoo	Новые данные авторов (см. данную работу)

Хорошо задокументирован факт, что синтетические поверхностно-активные вещества и детергенты могут интеркалировать (внедряться) в липидные двуслойные участки или другие части биомембран. Было показано, что синтетические ПАВ вносят серьезные нарушения в структуру слоев липидов.

Таким образом, в результате воздействия синтетических ПАВ могут изменяться структурные и функциональные параметры биомембран [11, 13]. Таким образом, есть серьезные причины считать эти химические вещества мембранотропными агентами.

Проблема загрязнения воды поверхностно-активными веществами и смесевыми химическими продуктами, содержащими ПАВ, была подробно проанализирована в предыдущих публикациях, а именно монографиях [11, 13]. Данная статья основана на предыдущих публикациях авторов, в том числе [6-16]. Представленные здесь результаты дают дальнейшее обоснование основных выводов, сделанных в этих монографиях, включая вывод, что ПАВ и ПАВ-содержащие композиции (детергенты) – значительно более опасные загрязнители окружающей среды, чем считали ранее.

Выводы

1. Фитотест с *Vigna radiata* выявил токсичные свойства (фитотоксичность) представителя смесевых химических веществ, загрязняющих биосферу, а именно Ginger Polygonum Multiflorum Nutrient Shampoo (GPMNS).

2. Гипотеза, сформулированная в начале этой статьи о возможной токсичности (фитотоксичности) этого вещества, подтвердилась в опытах с *Vigna radiata*.

3. Установлено, что фитотест с *Vigna radiata* - эффективный метод количественного изучения биологических (фитотоксических) эффектов того класса веществ, к которому относится изученное вещество.

4. Обнаружено, что при определенных концентрациях (0,5% и более) и длительности экспозиции (инкубации в течение 48 ч и более) исследуемое вещество, а именно GPMNS, ингибировало удлинение проростков растений (*Vigna radiata*).

5. В составе исследованного вещества есть экстракты лекарственных растений. Однако их наличие не нейтрализовало токсичность этого вещества.

Список литературы

[1] Dave N., and Joshi T., A concise review on surfactants and its significance // Int. J. Appl. Chem., 2017. V.13. – P. 663-672.

[2] Massarweh O., and Abushaikha A.S., The use of surfactants in enhanced oil recovery: a review of recent advances. // Energy Reports, 2020. No.6. – P.3150-3178.

[3] Cornwell P.A., A review of shampoo surfactant technology: consumer benefits, raw materials and recent developments. // International journal of cosmetic science, 2018. V. 40(1). – P.16-30.

[4] Горюнова С.В., Остроумов С.А. Воздействие анионного детергента на зеленую протококковую водоросль и проростки некоторых покрытосеменных растений // Научные доклады высшей школы. Биологические науки, 1986. № 7. – С. 84-86. URL <https://istina.msu.ru/publications/article/1062884/>.

[5] Лазарева Е.В., Остроумов С.А. Ускорение снижения концентрации поверхностно - активного вещества в воде микрокосма в присутствии растений: инновации для фитотехнологии // Доклады Академии Наук, 2009. Т. 425, № 6. – С. 843–845. URL <http://www.scribd.com/doc/61655262/>; DOI: 10.1134/S0012496609020276.

[6] Максимов В.Н., Нагель Х., Ковалева Т.Н., Остроумов С.А. Биотестирование вод, загрязненных сульфенолом // Водные ресурсы, 1988. №1. – С. 165-168. URL <https://istina.msu.ru/publications/article/1062905/>.

[7] Максимов В.Н., Нагель Х., Остроумов С.А. Биотестирование вод, содержащих ПАВ (сульфенол) и ДНОК. // Гидробиологический журнал, 1988. Т.24 (4). – С.54-55. URL <http://www.scribd.com/doc/68523554/>; <https://www.academia.edu/40718662/>.

[8] Mtisi M., and Gwenzi W., Evaluation of the phytotoxicity of coal ash on lettuce (*Lactuca sativa* L.) germination, growth and metal uptake. // Ecotoxicology and Environmental Safety, 2019. V.170. – P. 750-762. DOI: 10.1016/j.ecoenv.2018.12.047.

[9] Нагель Х., Остроумов С.А., Максимов В.Н. Ингибирование роста проростков гречихи под воздействием додецилсульфата натрия // Научн. доклады высшей школы. Биол. Науки, 1987. – № 12. – С. 81-84. URL <https://istina.msu.ru/publications/article/1062896/>.

- [10] Остроумов С.А. Некоторые аспекты оценки биологической активности ксенобиотиков. // Вестник Московского ун-та, серия 16. Биология, 1990. № 2. – С.27-34. URL <https://istina.msu.ru/publications/article/1063940/>.
- [11] Остроумов С.А. Биологические эффекты действия ПАВ на организмы. – Москва, МАКС-Пресс, 2001. – 334 с. URL <https://istina.msu.ru/publications/book/610751/>.
- [12] Ostroumov S.A. On the Biotic Self-purification of Aquatic Ecosystems: Elements of the Theory. // Doklady Biological Sciences, 2004. V. 396. – P. 206-211. DOI: <https://doi.org/10.1023/B:DOBS.0000033278.12858.12>.
- [13] Ostroumov S.A. Biological effects of surfactants. – Boca Raton, London, New York: CRC Press, Taylor & Francis, 2006. – 279 p. URL <https://www.academia.edu/826799/>.
- [14] Остроумов С.А., Головки А.Э. Биотестирование токсичности поверхностно-активного вещества (сульфонола) с использованием проростков риса как тест-объекта // Гидробиол. журнал, 1992. Т. 28. № 3. – С. 72-75. URL <https://istina.msu.ru/publications/article/1064142/>.
- [15] Cai X., Остроумов С.А. Биотестирование химических веществ в целях количественной оценки экологической опасности и экотоксичности: фитотест на *Vigna radiata* // Использование и охрана природных ресурсов в России. — 2021. — № 2. — С. 74–77.
- [16] Остроумов С.А., Хорошилов В.С. Биотестирование вод, загрязненных поверхностно-активными веществами // Известия Академии наук, серия биологическая, 1992. № 3. – С. 452-458. URL <https://istina.msu.ru/publications/article/1064130/>.

Ботанический сад президента МОИП

Садчиков А.П.^{1,2,3}

¹ *Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова, Международный учебно-научный биотехнологический центр, г. Москва, Россия*

² *Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова, биологический факультет, г. Москва, Россия*

³ *Московское общество испытателей природы, г. Москва, Россия*

В XVIII и XIX веках в Москве было много ботанических садов. Каждый мало-мальски состоятельный человек считал своим долгом организовать свой собственный ботанический сад. Не сад фруктовых деревьев, а ботанический сад со всеми атрибутами этого учреждения. Обязательным считалось наличие в нем «заморских» растений. Одни ботанические сады использовались для утилитарных целей, в качестве «аптекарских огородов», другие – «для души», развития науки. XIX век – это время развития естествознания, а ботаника являлась его основой. Среди людей разных сословий стало модным собирать растения и составлять гербарии. Девушки своим ухажерам демонстрировали гербарий, показывая тем самым свою образованность.

Мы расскажем об одном из таких ботанических садов, частном ботаническом саде графа Алексея Григорьевича Разумовского, который был одним из самых крупных не только в России, но и Европы. Этот сад считался одним из «чудес света» Москвы. В нем работали и проводили научные исследования профессора Московского университета и члены Императорского Московского общества испытателей природы. Располагался он в Горенках, усадьбе графа А.Г. Разумовского.

Горенки находятся на востоке г. Москвы, сразу же за современной кольцевой дорогой, недалеко от г. Балашихи. А в начале XIX века это была дальняя окраина Москвы.



Село Горенки часто меняло своих владельцев. Первыми основателями усадебного ансамбля Горенок были князья Долгоруковы, владевшие вотчиной с 1714 по 1730 годы.

Князем Алексеем Григорьевичем Долгоруковым были выстроены каменные палаты, устроены пруды, высажены фруктовые сады и оранжереи. В это же время в Горенках было создано специализированное садоводческое хозяйство, в котором выращивали саженцы декоративных и плодовых деревьев для украшения имения и на продажу.

Алексей Григорьевич – это тот самый Долгоруков, который пытался женить императора Петра II на своей дочери Екатерине, молодые даже были обручены. Скоротечная смерть Петра II помешала влить в императорскую семью русскую кровь. По некоторым сведениям, княжна через несколько месяцев после смерти Петра II родила дочь. Однако это не помешало вступившей на престол Анне Иоанновне отправить все семейство Долгоруковых в ссылку, Берёзов (Ханты-Мансийский округ).

В 1747 году имение Горенки было продано графу Алексею Григорьевичу Разумовскому, фамилия которого владела усадьбой до 1827 года. Строительством и обустройством усадьбы занялся Алексей Кириллович Разумовский, племянник всесильного графа и фаворита императрицы Елизаветы Петровны. Известный художник-архитектор А.А. Менелас разработал проект дворцово-паркового ансамбля из дома и, расположенного на берегу запруженной речки Горенки, живописного парка в английском стиле. Менеласом были распланированы аллеи, места расположения мраморных статуй, спроектированы беседки, павильоны и живописные руины.

Дом был отреставрирован, а вокруг, под наблюдением известных русских и иностранных ученых, устроены оранжереи и питомники. На участке перед домом размещался зверинец. Там же был организован ботанический сад, который впоследствии стал крупнейшим в Европе. Особенно славилось собрание сибирской флоры. Согласно систематическому каталогу, в Горенках выращивалось более трех тысяч акклиматизированных растений. Всего же в ботаническом саду А.К. Разумовского в Горенках произрастало до 12 тыс. видов и разновидностей растений, значительная часть которых была представлена российской флорой, привезенной со всех концов Российской Империи.

А.К. Разумовский, один из богатейших и просвещенных вельмож своего времени, страстно увлекался ботаникой. В его парке были собраны редкие растения со всего света, в том числе экзотические плодовые деревья, кустарники, лечебные травы. Они были непосредственно включены в парковый пейзаж, часть выращивалась на специальных участках и многочисленных оранжереях. Даже дом Разумовского частично был превращен в оранжерею. На специально устроенной террасе граф выращивал в вазонах цветы, а в кадках – привезенные из дальних стран тропические деревья.

Оранжереи, примыкавшие к дворцу, обрамляли цветочный партер с итальянскими мраморными скульптурами. Несколько поодаль находилось здание главной оранжереи, около

которого располагался участок коллекционных растений. В отдельном специальном здании хранилась огромная коллекция семян, которые привозились со всех концов света. За прудом парка напротив дворца было возведено специальные здания для гербария и коллекции минералов. Обширная библиотека также занимала отдельное здание.

Горенский сад в период своего расцвета был тесно связан с развитием ботанической науки в России. Библиотека Горенок постоянно пополнялась новейшими сочинениями естествоиспытателей. К созданию ботанического сада Горенок были подключены выдающиеся русские ученые Московского университета и Московского общества испытателей природы. Среди них были крупнейшие ботаники профессора Ф.Х. Стевен, И.И. Редовский, Ф.Б. Фишер. В Горенках проводили исследования по акклиматизации растений в России. Их выращивали в оранжереях и открытом грунте. Здесь были собраны пальмы, бамбук, ямайский кедр, американская маслина, редкая драконова кровь и др.

В ботаническом саду работали и проводили исследования крупнейшие российские и зарубежные ботаники. Университетская профессура, адъюнкты приезжали из Москвы в усадьбу Разумовского, многие жили там месяцами на полном довольствии, пользовались уникальной библиотекой, оранжереями и теплицами для углубленной научной работы. Главные садовники были профессорского звания; в саду трудились 15 садовников – профессоров и адъюнктов (помощник профессора, ассистент) и 100 «подсадовников».

Главным садовником (директором) работал профессор Московского университета и член МОИП Иван Иванович Редовский – русский ботаник, исследователь Сибири и Камчатки. Ему удалось собрать единственную в Европе коллекцию сибирской флоры и составивший первый каталог сада. В 1805 он отправился с российским посольством в Китай, затем исследовал Восточную Сибирь, продолжал присылать в Горенки саженцы и семена из Китая и Сибири, пока не погиб в одной из экспедиций. Его именем названы многие виды растений, в частности Рододендрон Редовского (*Rhododendron redowskia*).

Другой ботаник, натуралист и этнограф Григорий Иванович Лангсдорф – участник кругосветного плавания под командованием Ивана Федоровича Крузенштерна – регулярно присылал семена и образцы североамериканской и бразильской флоры во время экспедиции на шлюпе «Надежда» (1803-1806). В 1812 г. он был назначен русским консулом в Рио-де-Жанейро и продолжал присылать семена и саженцы растений в Горенки. Будучи в Бразилии организовал русскую экспедицию для изучения внутренних районов страны. Г.И. Лангсдорф и И.Ф. Крузенштерн были членами МОИП.

Главным садовником ботанического сада в Горенках также был Фридрих Христианович Стевен, русский ботаник шведского происхождения. Под его наблюдением растения высаживались в соответствии с их классификацией «по гармоническому средству оных».

Стивен впоследствии работал в Крыму, был одним из организаторов и первым директором Никитского ботанического сада в Крыму. Именем Стивена названы многие виды растений: айстрик, борщевик, боярышник, клен, пион, шлемник, ясколка и др. В течение 60-летней научной деятельности Ф.Х. Стивен опубликовал большое число работ по ботанике, энтомологии, шелководству, виноделию и другим отраслям сельского хозяйства. Наиболее важные работы были опубликованы в изданиях Московского общества испытателей природы. За заслуги перед естествознанием Ф.Х. Стивен избран почетным членом МОИП.

Последний главный садовник Горенок – профессор Московского университета и член МОИП Федор Богданович Фишер, постоянно жил в усадьбе, а позднее стал директором Императорского ботанического сада в Санкт-Петербурге. Фишер был приглашен в Москву в 1806 году для управления ботаническим садом в Горенках, руководил им до 1822 г. Затем был переведен в Санкт-Петербург. В честь Ф.Б. Фишера названы два рода растений, в частности Фишерия (*Fischeria* DC) – растение из семейства ластовневые (ваточниковые).

Горенки стали крупнейшим ботаническим научным центром в России. В 1809 г. Горенках было создано Российское фитографическое (ботаническое) общество, которое вело активную переписку, обмен семенами и образцами растений с ботаниками всей Европы. Его возглавлял сам А.К. Разумовский. Впоследствии (1811 г.) оно было слито с Императорским Московским обществом испытателей природы.

Многие растения, выращивавшиеся в Горенках, были неизвестны в Европе. Они были впервые доставлены туда из Сибири, Алтая, Кавказа, Аляски, Бразилии. Многие европейские ботаники специально приезжали в Горенки для их изучения и описания. В главной оранжерее произрастало около трехсот тропических деревьев. В теплицах выращивались дотоле неизвестные растения, получившие в честь графа свое название «Razoumovia».

Граф Алексей Кириллович отличался деспотичным нравом, не терпел праздных бесед и докучливых соседей. Все свободное время он использовал для занятий ботаникой. Практически весь годовой доход он тратил на свою страсть – ботанику. Содержание научного и обслуживающего персонала обходилось графу в 70 000 рублей ежегодно – сумма для того времени огромная. В Москве поговаривали, что Алексей Кириллович печется о растениях и ученых ботаниках куда сильнее, нежели о родных детях. Возможно, это было близко к правде. Растения он действительно любил, и тратил огромные средства на их существование.

Известный литератор начала XIX века П.П. Свиньин, часто бывавший в Горенках, писал: *«Дом и английский сад прекрасны, но богатства природы, собранные в теплицах и оранжереях, приводят в восхищение: невольно изумляешься, как частный человек мог соединить в немногие годы столько сокровищ природы из всех стран света. В здании около 40*

футов вышины собраны огромные редкие деревья, и зритель гуляет в тени пальм, кипарисов, бамбука, ямайского кедра и других деревьев, столь же редких и замечательных, как драконова кровь, американская маслина и проч. Большая часть растений расположена в семи отдельных корпусах, заключающих шестнадцать оранжерей, из коих одиннадцать разных температур и пять теплиц. Здесь переходишь из Африки в Азию, из тропиков одним шагом очутишься у полюсов! Какое очарование, какое наслаждение переноситься столь правдоподобным образом из одной крайности мира в другую; взирать на быстрые изменения природы в органических существах, сближенных дерзновенной рукою смертного».

Кстати, сорок футов – это около 12 метров.

В Горенках растения выращивались как в открытом грунте, так и в оранжереях, число которых постепенно увеличилось. Акклиматизация некоторых из них проводилась столь успешно, что, как утверждают, до последнего времени в парке усадьбы можно встретить свободно растущие в диком виде растения, не свойственные флоре Подмосковья. При ботаническом саде функционировал питомник, где все желающие могли купить рассаду и саженцы редких растений.

Горенские оранжереи, а их было 16 (по другим сведениям – 40), причем 11 – с разными температурами, слагались более чем в полторы километра в длину. А площадь самого ботанического сада составляла около 2 км². К примеру, площадь Главного ботанического сада РАН 3 км².

* * *

А.К. Разумовский покровительствовал Московскому обществу испытателей природы, организованному в 1805 г. Он был назначен первым президентом МОИП, которым он оставался вплоть до 1817 г. При А.К. Разумовском Общество стало именоваться «Императорским». Был составлен план систематического описания Московской губернии; были организованы несколько экспедиций по Подмосковью, в южные и восточные районы страны. Общество в значительной степени финансировалось из личных средств графа.

В 1807 году Разумовский стал попечителем Московского учебного округа и Московского университета, а в конце 1809 года – Министром народного просвещения, пробыв на этой должности до 1816 года.

Будучи попечителем университета, он издал указ об избрании ректора на три года (вместо одного года, ранее). При нем Московский университет удостоился небывалой до сего времени чести: 14-го декабря 1809 г. Император Александр I посетил университет вместе со своей сестрой Екатериной Павловной. Его Величество остался доволен университетом, отозвался добрым словом о профессорах и порядке управления. Зал, где он выступал перед профессорами, и по сей день называется «императорским».

При министре А.К. Разумовском были открыты 72 приходские школы, 24 уездные училища, несколько гимназий, одно сиротское и городское училище в Москве; улучшено преподавание; открыто несколько научных обществ; учреждена при Московском университете первая кафедра славянской филологии. При нем были открыты гимназии в Киеве, Симбирске, Харькове, Белостоке, греческое Александровское училище в Нежине. В 1814 г. был открыт Казанский университет. При Разумовском был открыт Императорский Царскосельский лицей, устав которого он редактировал самолично.

В 1816 г. Разумовский ушел в отставку. Первые два года после этого А.К. Разумовский жил в Москве и в своем подмосковном имении – Горенках. С 1818 г. он жил в Малороссии, в Черниговской губернии, где и умер в 1822 г.

* * *

После смерти А.К. Разумовского любимое детище графа пришло в упадок очень быстро, ведь растения, как известно, не могут долго жить без присмотра. Главный садовник Горенок Ф.Б. Фишер был приглашен на должность директора Санкт-Петербургского ботанического сада. Туда же из Горенок им была перевезена обширная естественнонаучная библиотека и огромный графский гербарий. Большое количество растений, выращивавшихся в оранжереях, перевез к себе владелец усадьбы Архангельское князь Николай Борисович Юсупов. Он же вывез оттуда часть парковых скульптур. Другая часть растений поступила в ботанический сад Московского университета. То, что осталось, было продано окрестным помещиками. Вот так и закончилось существование знаменитого ботанического сада в Горенках.

По материалам:

<https://ru.wikipedia.org/wiki/>;

<http://www.balabike.ru/>;

<http://www.ikmb.ru/>;

<http://www.ru-roads.ru/>;

<http://fictionbook.ru/>

Первые метеорологические наблюдения в Москве

Садчиков А.П.^{1,2,3}

¹ *Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова, Международный учебно-научный биотехнологический центр, г. Москва, Россия*

² *Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова, биологический факультет, г. Москва, Россия*

³ *Московское общество испытателей природы, г. Москва, Россия*

Сведения о погоде стали для нас настолько привычными, что мы уже не представляем свою жизнь без этой информации. Как одеться, накинуть ли плащ, взять зонтик или нет, все это зависит от сведений о погоде. Даже наше настроение во многом связано с погодой, причем во многом оно зависит не столько от самой погоды, сколько от сведений о ней.

А теперь вопрос, когда в Москве стали регулярно информировать граждан о погоде и кто это делал? Оказывается, у истоков метеонаблюдений в Москве стояли конкретные люди и даже известны годы, когда стали публиковать в газете сведения о погоде. Это профессор физики Московского университета Петр Иванович Страхов и граф Алексей Кириллович Разумовский, который в то время был попечителем Московского университета. К этому также приложили свои «руки» Московский университет и организованное при университете Московское общество испытателей природы.

В 1808 г. по распоряжению А.К. Разумовского в университетской газете «Московские Ведомости» стала печататься информация о метеорологических наблюдениях, проводимых профессором физики П.И. Страховым три раза в день.

Первые наблюдения за погодой в России осуществляли еще при Петре I, когда была организована сеть метеостанций. В 1725 г. при Петербургской Академии наук стали проводиться регулярные наблюдения с использованием барометра и термометра, затем была создана сеть из 20 метеостанций. Но это были «государевы» учреждения, а в Москве, наблюдения велись «для народа» и осуществляли их профессора, студенты Московского университета и члены Московского общества испытателей природы.

* * *

В начале XIX века возраст Московского университета приближался к 50 годам. В 1805 году было организовано Московское общество испытателей природы, учредителями которого были профессора и студенты Московского университета, а также представители гимназии, организованной при университете. Первым президентом МОИП стал граф А.К. Разумовский, который в то время занимал пост товарища Министра (заместитель министра) просвещения. Он же был попечителем Московского университета.

Алексей Кириллович Разумовский много помогал Обществу испытателей природы, финансировал его деятельность, организовывал научные экспедиции. При А.К. Разумовском Общества стало именоваться «Императорским». С его участием был составлен план систематического описания Московской губернии; были организованы несколько экспедиций по Подмоскovie, а также в южные и восточные регионы страны. Сам Разумовский (богатейший человек того времени) увлекался ботаникой, был владельцем огромного (наверное, самого крупного в Европе) ботанического сада. Он располагался в имении Горенки на востоке Москвы, сразу же за современной кольцевой дорогой. Его площадь составляла более двух квадратных километров, а длина одних только теплиц превышала полтора километра, в которых произрастали более 500 цитрусовых деревьев. Всего в ботаническом саду произрастали более 2000 видов различных растений. Многие путешественники привозили растения из дальних стран и континентов. Сейчас, к большому сожалению, от его величия ничего не осталось.

Его внебрачный сын Алексей Перовский (тогда студент университета) был тем самым студентом, который имел честь стать учредителем МОИП. Алексей в студенческие годы увлекался естествознанием. В 1808 году отдельной книгой были изданы три публичные лекции Алексея Перовского по ботанике: «Как различать животных от растений», «О цели и пользе Линнеевой системы растений» и «О растениях, которые бы полезно было размножить в России». Они были прочитаны и опубликованы на русском, немецком и французском языках. Фактически это была его выпускная дипломная работа. А. Перовский, крупный писатель того времени, публиковался под псевдонимом Антоний Погорельский. В 1829 году Погорельский опубликовал детскую сказку «Черная курица, или Подземные жители», написанную для десятилетнего племянника Алёши – Алексея Константиновича Толстого, будущего писателя и поэта. Эта книга и сейчас хорошо известна маленьким читателям.

Среди учредителей МОИП был Петр Михайлович Добрынин, директор Гимназии, которая была организована в 1755 г. при Московском университете. Гимназия готовила учащихся к обучению в университете. Среди ее питомцев были известные люди, такие как М.Н. Муравьев (в последующем попечитель Московского университета), П.И. Страхов, Д.И. Фонвизин (драматург), Х.А. Чеботарев (ректор университета), М.Я. Мудров, А.Ф. Мерзляков и др. М.Я. Мудров – профессор Московского университета, врач, впервые в России ввел в практику медицинскую карту больного, куда записывал сведения о больном, примененных методах лечения и др. За 22 года лечебной практики собрание карточек составило 40 томов. А.Ф. Мерзляков – русский поэт, профессор, возглавлял кафедру словесности в университете. В настоящее время широкой популярностью пользуется его романс – «Чернобровый, черноокий...».

П.И. Страхов – был из бедной семьи, при поступлении в гимназию при университете показал хорошие знания и был принят в качестве казеннокоштного учащегося (обучался за счет государства). Окончил обучение с отличием, ему за государственный счет был сшит зеленый мундир и выдана студенческая шпага. Потом он был отправлен в зарубежную командировку на стажировку. По возвращении из командировки в сентябре 1786 года Страхов исполнял должность инспектора в университетской гимназии, а в 1791 году возглавил кафедру опытной физики.

Это решение вызвало раздражение у некоторой части профессоров университета. В результате ординарного профессора П.И. Страхова заставили писать диссертацию на русском языке по физике. Страхов представил на суд Конференции (Ученого совета) работу «Рассуждение о движении тел и особенно звезд небесных». Затем было придумано новое испытание – переписать это сочинение на латинский язык. Страхов выполнил и это условие. Кроме того, он с большим блеском прочитал на русском языке пробную лекцию «О свойствах и химическом сложении атмосферы, воздуха и других ему подобных веществ» – область, которая его увлекла еще в Париже, когда он, будучи на стажировке, слушал лекции профессора М.-Ж. Бриссона (французский естествоиспытатель, физик).

Лекции по физике в Московском университете П.И. Страхов впервые начал читать на русском языке, перевел на русский язык курс физики М.-Ж. Бриссона. В период 1803–1808 гг. Страхов занимался созданием собственного учебника «Краткое начертание физики». Это был первый учебник физики на русском языке, опубликован в 1810 году.

П.И. Страхов проявил себя не только прекрасным преподавателем, но и талантливым популяризатором. Лекции П.И. Страхова сопровождались многочисленными физическими демонстрациями, читались на русском языке. В 1803 г. в Московском университете было организовано систематическое проведение публичных лекций. Выступления Страхова собирали много народа из разных слоев московского общества, причем не только университетских коллег, но и посторонних «благородных обоого пола особ». Первые ряды кресел обычно занимали дамы, далее – посетители мужского пола и студенты. Н.М. Карамзин, регулярно посещавший их, отмечал: *«Феномены силы электрической, Гальванизма, опыты аэростатические и др. сами по себе столь любопытны и господин Страхов объясняет их столь хорошо, столь вразумительно, что публика находит отменное удовольствие в слушании его лекций»*.

Директор (ректор) университета П.И. Фонвизин (младший брат Дениса Фонвизина) распорядился оборудовать для лекций по физике специальную аудиторию, расположенную амфитеатром, и выделил особое помещение для физического кабинета.

Страхов впервые в России провел опыты, доказывающие электропроводность воды и влажной земли, причем эти эксперименты он проводил не в лаборатории, а на природе. Об этих результатах была напечатана заметка в первом номере «Журнала Московского общества испытателей природы». Большое внимание Страхов уделял физике атмосферы, изучал явления грозы и разрядов молнии, исследовал вызванные ими повреждения, делал многочисленные опыты с электричеством и работал над усовершенствованием громоотводов.

С 1808 года Страхов организовал систематические метеорологические наблюдения – три раза в день. В его работах часто участвовали студенты, что значительно поднимало у них интерес к физике. Они измеряли температуру воздуха, почвы, воды, атмосферное давление, влажность, количество выпавших осадков, направление и скорость ветра, а также другие метеорологические показатели. Наблюдения велись в соответствии с существующими в Европе инструкциями, замеры заносились в таблицы стандартной формы, т.е. все делалось не просто так, а «по науке».

Граф Разумовский (попечитель университета), знавший об этих наблюдениях, распорядился, чтобы отчеты публиковались в газете «Московские Ведомости». Кстати, это была единственная газета, издаваемая в то время в Москве.

П.И. Страхов в 1805 году был избран почетным членом Московского Общества испытателей природы; избирался ректором Московского университета (1805–1807), награжден орденом Св. Анны 2-й степени с алмазами. Позднее к нему добавился орден Святого Владимира IV степени.

В соответствии с новым уставом Московского университета П.И. Страхов переизбирался на ректорскую должность в 1806 и 1807 гг. В университете П.И. Страхов пользовался всеобщим доверием и уважением, *«умея сам повиноваться, умел благородно и начальствовать»*. В 1807 г. Страхов подал прошение об отставке по состоянию здоровья.

В его ректорство в 1805 году был принят на должность университетского архитектора М.Ф. Казаков, построивший здание главного корпуса на Моховой улице. При нем было увеличено число аудиторных помещений, расширено помещение библиотеки. Страхов предпринял усилия для сохранения при университете гимназии, над которой нависла угроза закрытия. Средства на поддержку гимназий поступали от хозяйственной деятельности университетской типографии, а также финансовой поддержки промышленника П.Г. Демидова.

В 1812 году во время нашествия войск Наполеона П.И. Страхов руководил эвакуацией университетского имущества; переехал в Нижний Новгород, где и скончался. Похоронен на местном Петропавловском кладбище.

* * *

Газета «**Московские ведомости**» принадлежала Московскому университету, издавалась в 1756–1917 годах (т.е. 160 лет). Она была создана указом императрицы Елизаветы Петровны (1756) при Московском университете. Первый номер вышел в пятницу, 26 апреля 1756 г. и был приурочен к первой годовщине открытия университета. Формат газеты – А3, в среднем 8 страниц текста. На первой странице был изображен герб Российской империи двуглавый орел, который был единственным графическим изображением. «Московские ведомости» долгое время оставались единственной периодической газетой Москвы. Вначале она выходила два раза в неделю, затем – три, а ближе к концу XIX века – ежедневно.

Пресноводные водоемы: причины загрязнения и пути оздоровления

Садчиков А.П.^{1,2,3}, Герасимова Т.Н.⁴

¹ Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова,
Международный учебно-научный биотехнологический центр, г. Москва, Россия

² Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова,
биологический факультет, г. Москва, Россия

³ Московское общество испытателей природы, г. Москва, Россия

⁴ Институт водных проблем РАН, г. Москва, Россия



Рис. Дафния пулекс

Пресноводные водоемы в значительной мере подвержены антропогенному воздействию. Они чаще всего имеют замедленный водообмен, а уровень воды в них поддерживается за счет рек, ручьев, подземных родников и атмосферных осадков. В основном это неглубокие водоемы, где уровень воды в течение года сильно колеблется.

Большая водосборная площадь способствует поступлению в такие водоемы минеральных удобрений и органических веществ с сельскохозяйственных полей и животноводческих ферм.

Такие водоемы по своему положению в рельефе суши являются аккумуляторами многих минеральных и органических веществ, которые циркулируют в пределах водосбора, переносятся стоками и достигают этих водоемов.

В водоемы поступает большое количество биогенных веществ, в первую очередь соединения азота и фосфора, столь необходимых для развития водной растительности. Одна из причин – это различные стоки, содержащие моющие средства, используемые в быту и промышленности. Многие из них содержат в своей основе полифосфаты.

Таким образом, любой водоем – это своеобразная чаша, где накапливаются многие органические и минеральные вещества.

Наличие повышенного содержания биогенных веществ приводит к интенсивному развитию водной растительности и «цветению» водоемов. Этот процесс называется эвтрофированием водоемов. Характерный признак эвтрофирования – зарастание их прибрежной растительностью.

В открытой части водоемов интенсивно развивается фитопланктон, в основном за счет массового развития цианобактерий (ранее их называли синезеленые водоросли). Наиболее массово развиваются виды из родов *Microcystis*, *Aphanizomenon*, *Anabaena*, *Gloetrichia*, *Oscillatoria*, *Lyngbya* и др. причем продолжительность такого цветения может достигать одного и даже двух месяцев. Они относятся к группе растений, которые могут развиваться до предельно высоких концентраций.

Механизм «взрывного» характера развития цианобактерий связан колоссальным потенциалом их размножения. Неблагоприятные зимние условия они переживают на дне или в виде высохших скоплений в прибрежной части водоема. Весной при температуре воды около 6°C они начинают постепенно развиваться и за короткий срок захватывают всю толщу воды. Дополнительная причина, которая способствует развитию цианобактерий, это низкое турбулентное перемешивание таких водоемов. В значительной мере по этой причине «цветут» равнинные водохранилища, особенно в южных регионах.

В прибрежной части водоема наряду с зарастанием тростника, рогоза, рдестов, ряски усиливается развитие нитчатых водорослей, способных потреблять органические вещества. Их отмирание осенью и зимой приводит к вторичному загрязнению водоема.

Массовое развитие цианобактерий приводит к увеличению содержания органического вещества в растворенной и взвешенной формах. Их разрушение бактериями осуществляется с интенсивным потреблением кислорода. В летнее время в эпилимнионе дефицит кислорода сравнительно легко восстанавливается за счет газообмена с атмосферой и фотосинтеза растений. Зимой, в период ледостава, в гипolimнионе возможно полное потребление кислорода. Наблюдается дефицит кислорода в придонной части, наблюдаются заморные явления. В зимнее время заморы часто происходят во всей толще воды, что приводит к массовой гибели рыб. Недостаток кислорода приводит к образованию в придонной зоне сероводорода и метана.

Цианобактерии становятся доминирующей группой водорослей, вытесняя другие виды. В структуре фитопланктонного сообщества резко снижается роль диатомовых и золотистых водорослей. При этом увеличивается роль некоторых зеленых и эвгленовых водорослей,

которые могут вести сапрофитный образ жизни, т.е. потреблять готовое органическое вещество.

Развитие цианобактерий отрицательно сказывается на зоопланктонном сообществе. Это связано с тем, что зоопланктон в основном питается мелкими водорослями, тогда как при «цветении» водоемов развиваются крупные и колониальные водоросли, которые практически не потребляются зоопланктоном. Они включаются в трофическую цепь только после их разрушения бактериями.

В составе зоопланктона происходит уменьшение их видового разнообразия в сторону упрощения сообщества. Наблюдается преобладание мелких видов, которые не могут столь интенсивно утилизировать синтезированное органическое вещество.

Нарушение кислородного режима в придонных слоях приводит к изменению в составе бентоса; выпадают многие донные организмы, которые являются потребителями органического вещества. В результате бентос становится беднее и менее разнообразным.

Эвтрофирование водоемов оказывает влияние и на рыбное население. В результате остаются рыбы (в основном карась), приспособленные к минимальному содержанию в воде кислорода.

* * *

Исследования в высокотрофных прудах показали, что качественный и количественный состав зоопланктона во многом определяется трофическим прессом рыб-планктофагов и мальками рыб. Некоторые виды рыб-планктофагов имеют продолжительный порционный нерест в течение всего вегетационного сезона, вплоть до осени. Из-за этого в исследованных прудах постоянно присутствовали мальки и молодь рыб разного размера. Рыбы-планктофаги жестко контролировали численность и размерный состав зоопланктона.

Трофический пресс рыб в эвтрофном пруду приводит к снижению биомассы зоопланктона и обеднению его видового состава. Рыбы выедают в основном крупные виды зоопланктона, из-за чего в планктоне остаются коловратки (размером 0.1-0.5 мм) и мелкоразмерные виды рачков (размер 0.5-1 мм), которые не могут сдерживать развитие цианобактерий. Наличие в водоеме большого количества биогенных элементов приводит к цветению цианобактерий и снижению прозрачности воды.

Мелкие виды и низкая биомасса растительных фильтраторов не могут эффективно влиять на развитие фитопланктона. Это сказывается на структуре фитопланктона. Наличие в водоеме большого количества биогенных элементов приводит к интенсивному цветению цианобактерий и снижению прозрачности воды до 0.2 м.

* * *

Воздействие рыб приводит к изменению видового и размерного состава зоопланктона. Из планктона исследованных нами прудов исчезли крупноразмерные кладоцеры – *Daphnia longispina*, *Simocephalus vetulus* и другие (хотя они встречались в водоеме в начале лета и осени). Размер многих видов рачков сильно уменьшился. Так, размер *Ceriodaphnia quadrangula* составлял 0.3-0.6 мм, *Chydorus sphaericus* – 0.2-0.3 мм, *Bosmina longirostris* – 0.3-0.4 мм. Размер *Diaphanosoma brachyurum* не превышал 0.9 мм. Крупноразмерные кладоцеры *Daphnia longispina* присутствовали в пруду, однако их размер не превышал 0.5-0.6 мм. Во время максимального цветения цианобактерий в августе в составе кладоцер были зарегистрированы лишь *Chydorus sphaericus* и *Daphnia longispina* длиной особей 0.3 и 0.5 мм, соответственно. Таким образом, в пруду размер этих видов был на уровне размера коловраток.

Наибольший размер *Daphnia longispina* (1.15 мм) был зарегистрирован только в конце сентября. Скорее всего, в это время из-за низкой температуры воды (около 12°C) активность рыб-планктофагов и их мальков уменьшилась. Другой крупноразмерный представитель кладоцер *Simocephalus vetulus* также был зарегистрирован только в середине сентября, размером 1.3 мм. Размерный состав коловраток оставался на уровне 0.1 мм.

В пруду, в котором отсутствовали рыбы-планктофаги, несмотря на наличие большого количества биогенных веществ, цветение цианобактерий не наблюдалось. В этом пруду развиваются в больших количествах *D. longispina*, которая выедала водоросли и цианобактерии. Прозрачность воды по диску Секки достигала более 2 м (практически до дна).

Выедание зоопланктона рыбами-планктофагами приводит к его измельчению, а это в свою очередь сказывается на цветении цианобактерий. Мелкие виды и низкая биомасса растительноядных фильтраторов не может эффективно влиять на развитие фитопланктона. Это сказывается на структуре фитопланктона, начинают развиваться цианобактерии и колониальные водоросли. А это приводит к усилению процессов цветения.

Работа выполнена в рамках темы № FMWZ-2022-0002 Государственного задания Института водных проблем РАН, а также в рамках междисциплинарной научно-образовательной школы Московского университета «Будущее планеты и глобальные изменения окружающей среды».

Список литературы

- 1) Герасимова Т.Н., Садчиков А.П. Восстановление качества вод: влияние зоопланктона на развитие цианобактерий в двух эвтрофных прудах. - журнал «Жизнь Земли». 2021. Т.43. № 3. С. 336-346.

- 2) Герасимова Т.Н., Погожев П.И., Садчиков А.П. Борьба с цианобактериями с использованием зоопланктона в экспериментально экосистеме. Ж. «Экологические системы и приборы», 2020. № 6. С. 49-55.
- 3) Остроумов С.А. Синэкологические основы решения проблемы эвтрофирования // Доклады академии наук (ДАН). 2001. том 381. № 5. С.709-712. <https://www.academia.edu/790367/>
- 4) Остроумов С.А., Садчиков А.П. Модификация радиоуглеродного метода (^{14}C) и количественная оценка выделения растворенного органического вещества (РОВ) детритом, поглощения и использования РОВ бактериями и фитопланктоном в воде мезотрофной экосистемы: интегральный метаболизм.// Ж. Экологическая химия. 2022. Том 31, № 6. С. 315-323.

Биосферная роль планктонных фильтраторов в водоемах

Садчиков А.П.^{1,2,3}, Герасимова Т.Н.⁴, Полякова Т.В.², Остроумов С.А.²

¹ *Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова, Международный учебно-научный биотехнологический центр, г. Москва, Россия*

² *Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова, биологический факультет, г. Москва, Россия*

³ *Московское общество испытателей природы, г. Москва, Россия*

⁴ *Институт водных проблем РАН, г. Москва, Россия*

В водоемах основная масса зоопланктона представлена видами с фильтрационным типом питания, на долю которых приходится до 80% общей массы зоопланктона. Именно зоопланктону принадлежит ведущая роль в передаче энергии по трофической цепи от фитопланктона к рыбам.

Роль зоопланктона велика еще и тем, что он, немногий из водных организмов, утилизирует микроводоросли, и транспортирует их энергию на более высокий трофический уровень. Сам же зоопланктон является пищевым объектом для более крупных беспозвоночных и рыб.

Зоопланктон потребляет в пищу клетки водорослей малых и средних размеров (в основном до 30-50 мкм), тогда как крупные и колониальные водоросли непосредственно не потребляются фильтраторами. Одной из особенностей водных экосистем является высокая скорость биотического круговорота. Этому способствуют не только бактерии, водоросли, но и зоопланктон. В связи с малыми размерами зоопланктон имеет интенсивный обмен веществ [1-4], высокую фильтрационную активность и плодовитость [5]. Фильтрационная способность их настолько велика, что в водоемах весь объем воды проходит через фильтрационный аппарат зоопланктона всего за одни сутки. В море биомасса зоопланктона значительно меньше, чем в пресных водоемах, но и там объем воды поверхностной зоны, в которой сконцентрирован зоопланктон, за год много раз проходит через фильтрационный аппарат ракообразных [6, 7].

В водных экосистемах зоопланктон, как основной потребитель водорослей, играет важную роль в трансформации органического вещества. В процессе жизнедеятельности планктонные животные минерализуют органическое вещество и выделяют во внешнюю среду метаболиты, которые в дальнейшем утилизируются бактериями и водорослями.

Фильтраторы, при наличии в среде большого количества пищи, потребляют ее в больших количествах, при этом слабо переваривают ее. Экскременты обладают высокой пищевой ценностью, что объясняется низкой усвояемостью потребленной пищи. Так что усвояемость пищи фильтраторами находится в обратной зависимости от ее количества в среде. Время нахождения пищи в кишечнике разных видов рачков составляет от 5-10 минут (*Daphnia*

galeata) до 45 минут (*D. magna*). Первая обитает в чистых и глубоких водоемах. *D. magna* обитает в небольших и неглубоких водоемах. Она имеет длинный кишечник, приспособленный для продолжительного переваривания клеток с плотными и студенистыми оболочками. Усвояемость водорослей крайне низкая – 5-10%. Из-за этого в среду поступает слабо переваренные экскременты. При этом они выделяют pellets (экскременты) от нескольких десятков до сотни в сутки. Pellets покрыты слизью (перитрофической мембраной), которая позволяет им достаточно долго не распадаться во время пребывания в воде. Размеры pellets достигает 0.1-0.5 мм, сильно меняются в зависимости от вида пищи, размера, пола и вида ракообразных [8-10].

Крупные и оформленные pellets играют большую роль в экосистеме водоемов. Из-за своих размеров они относительно быстро оседают в толще воды. В морях они являются пищей для глубоководных ракообразных и других беспозвоночных. В пресноводных водоемах они оседают на дно, где используются в пищу донными организмами (олигохетами, моллюсками, простейшими, хирономидами и другими личинками насекомых). Скорость оседания pellets ракообразных составляет от 50 до 1000 м/сутки, и сильно варьирует в зависимости вида рачков и состава пищи. Их дальнейшее разрушение и утилизация осуществляется на больших глубинах (в морях) или на дне (в пресных водоемах). Скорость оседания отмерших водорослей (детрита) составляет около 1 м/сутки.

Основными потребителями зоопланктона являются рыбы-планктофаги, а также молодь большинства рыб. Рыбы при охоте ориентируются визуально, поедают в основном крупных ракообразных.

Зоопланктон в глубоких водоемах выработал защитное приспособление – вертикальные миграции. Днем они находятся на больших глубинах. Там темно, из-за чего рыбы их не видят. Ночью и в сумерках рачки поднимаются в верхние слои водоема, где активно поедают водоросли.

Ветвистоусые (*Cladocera*) выработали еще одно приспособление для защиты популяции (сообщества) от выедания – это партеногенез (размножение без участия самцов). Летом при благоприятных условиях происходит ускоренное размножение, самки рожают только самок. Численность популяции возрастает, несмотря на интенсивное выедание ее хищниками. Так они поддерживают высокую численность популяции. Однако при неблагоприятных условиях среды (понижении температуры, недостатке пищи и др.) самки рожают самцов. Затем они спариваются и откладывают покоящиеся (так называемые зимние) яйца. Эти яйца имеют плотную оболочку, перезимовывают и переживают неблагоприятные условия среды.

Фильтрующий зоопланктон важен еще и тем, что он единственный, который отфильтровывает мельчайшие частицы (фитопланктон, бактерии, различный детрит и др.). Он

передает запасенную энергию на более высокий трофический уровень. За счет этой энергии функционирует вся экосистема пресных и морских вод – от водорослей, через фильтрующий зоопланктон – до крупных рыб и китов. Все они живут за счет солнечной энергии, запасенной в микроскопических водорослях.

* * *

Повышенное содержание биогенных веществ приводит к интенсивному развитию водорослей и «цветению» водоемов. Этот процесс называется эвтрофированием. При эвтрофировании водоемов происходит резкое увеличение биомассы фитопланктона, в основном за счет развития синезеленых водорослей (их еще называют цианобактериями). Цвети могут любые виды водорослей, но наибольший отрицательный эффект представляют цианобактерии. Продолжительность такого «цветения» может достигать двух месяцев и более. Механизм «взрывного» характера развития цианобактерий связан с колоссальным потенциалом их размножения. Дополнительная причина, которая способствует развитию цианобактерий, это слабое перемешивание таких водоемов. Цианобактерии плохо переносят турбулентное перемешивание вод, из-за чего в реках массового их развития не наблюдается. В значительной мере по этой причине «цветут» многие равнинные южные водохранилища. Цианобактерии обладают положительной плавучестью – при цветении всплывают к поверхности воды. Это приводит к высокой концентрации цианобактерий в верхнем слое водоема [11].

При «цветении» водоемов происходят значительные структурные изменения в водных сообществах. Цианобактерии становятся доминирующей группой, вытесняя другие виды водорослей. Из сообщества выпадают диатомовые, динофитовые, золотистые, зеленые и другие водоросли. В то же время, увеличивается численность крупных эвгленовых водорослей, способных потреблять растворенные органические вещества.

Массовое развитие цианобактерий приводит к увеличению содержания в водоеме органического вещества в растворенной и взвешенной формах. Их разрушение осуществляется бактериями с интенсивным потреблением кислорода. Органического вещества становится настолько много, что в водоеме наблюдается дефицит кислорода. Если в летнее время в верхнем слое водоема недостаток кислорода сравнительно легко восстанавливается за счет газообмена с атмосферой и фотосинтеза водорослей, то зимой, в период ледостава, в придонном слое возможно полное потребление кислорода. В зимнее время заморы порой происходят во всей толще воды, что приводит к массовой гибели рыб. Недостаток кислорода способствует образованию в придонной зоне сероводорода и метана.

Развитие цианобактерий отрицательно сказывается на зоопланктонном сообществе. Это связано с тем, что зоопланктон является фильтратором, и в основном поедает мелкие

водоросли. При «цветении» водоемов развиваются в основном колониальные формы, которые слабо потребляются зоопланктоном. Казалось бы, водорослей в среде много, но из-за крупных размеров они слабо используются в пищу. В результате в сообществе зоопланктона снижается плодовитость, уменьшаются размеры особей и их численность. Крупные виды выпадают их сообщества, наблюдается преобладание мелких видов, которые не могут столь интенсивно утилизировать цианобактерий.

Как уже отмечалось, наиболее активными фильтраторами являются крупные ветвистоусые и веслоногие ракообразные. Их, в свою очередь, потребляют (поедают) рыбы. Таким образом, трофическая цепь водоема, включающая «водоросли – фильтрующий зоопланктон – рыбы-планктофаги» замыкает трофическую цепь. Последние являются основными потребителями крупного зоопланктона.

Результаты исследований

Наши исследования в высокотрофных прудах показали, что качественный и количественный состав зоопланктона во многом определяется трофическим прессом рыб-планктофагов и мальками рыб. Большинство из них относится к «сорным» видам рыб. Некоторые виды рыб-планктофагов имеют продолжительный порционный нерест в течение всего вегетационного сезона, вплоть до осени. Из-за этого в исследованных прудах постоянно присутствовали мальки и молодь рыб разного размера. Рыбы-планктофаги жестко контролировали численность и размерный состав зоопланктона [12-15].

Трофический пресс рыб в эвтрофном пруду приводит к снижению биомассы зоопланктона и обеднению его видового состава. Рыбы выедают в основном крупные виды зоопланктона, из-за чего в планктоне остаются коловратки (размером 0.1-0.5 мм) и мелкоразмерные виды рачков (размер 0.5-1 мм), которые не могут сдерживать развитие цианобактерий. Наличие в водоеме большого количества биогенных элементов приводит к цветению цианобактерий и снижению прозрачности воды.

Мелкие виды и низкая биомасса растительных фильтраторов не могут эффективно влиять на развитие фитопланктона. Это сказывается на структуре фитопланктона. Наличие в водоеме большого количества биогенных элементов приводит к интенсивному цветению цианобактерий и снижению прозрачности воды, вплоть до 0.2 м.

* * *

Воздействие рыб приводит к изменению видового и размерного состава зоопланктона. Из планктона исследованных нами прудов исчезли крупноразмерные клadoцеры – *Daphnia longispina*, *Simoccephalus vetulus* и другие (хотя они встречались там в начале лета и осенью). Размер многих видов рачков сильно уменьшился. Так, размер *Ceriodaphnia quadrangula*

составлял 0.3-0.6 мм, *Chydorus sphaericus* – 0.2-0.3 мм, *Bosmina longirostris* – 0.3-0.4 мм. Размер *Diaphanosoma brachyurum* не превышал 0.9 мм. Крупноразмерные кладоцеры *Daphnia longispina* присутствовали в пруду, однако их размер не превышал 0.5-0.6 мм. Во время максимального цветения цианобактерий в августе в составе кладоцер были зарегистрированы лишь *Chydorus sphaericus* и *Daphnia longispina* длиной особей 0.3 и 0.5 мм, соответственно. Таким образом, в пруду размер этих видов был на уровне размера коловраток.

Наибольший размер *Daphnia longispina* (1.15 мм) был зарегистрирован только в конце сентября. Скорее всего, в это время из-за низкой температуры воды (около 12°C) активность рыб-планктофагов и их мальков уменьшилась. Другой крупноразмерный представитель кладоцер *Simocephalus vetulus* также был зарегистрирован только в середине сентября, размером 1.3 мм.

Копеподы *Eudiaptomus* sp. и *Mesocyclops leukartii* в пруду состояли в основном из науплиальных и копеподитных стадий. Взрослые копеподы выедались рыбами, а в сообществе оставались науплии и мелкие копеподиты. Размерный состав коловраток оставался на уровне 0.1 мм.

В пруду, в котором отсутствовали рыбы-планктофаги, несмотря на наличие большого количества биогенных веществ, цветение цианобактерий не наблюдалось [16]. В этом пруду развиваются в больших количествах *D. longispina*, которая выедала водоросли и цианобактерии. Прозрачность воды по диску Секки достигала более 2 м (практически до дна).

Выедание зоопланктона рыбами-планктофагами приводит к его измельчению, а это в свою очередь сказывается на цветении цианобактерий. Мелкие виды и низкая биомасса растительноядных фильтраторов не может эффективно влиять на развитие фитопланктона. Это сказывается на структуре фитопланктона, начинают развиваться цианобактерии и колониальные водоросли. А это приводит к усилению процессов цветения.

Во второй половине лета в пруду при повышении температуры воды начинают развиваться цианобактерии, которые полностью потребляют биогенные элементы. В водоеме количество дефицитного элемента для фотосинтетиков фосфора снизилось до нулевых значений.

Потребление цианобактерий в природных водоемах зоопланктоном зависит от их размера. А это, в свою очередь, определяется физиологическим состоянием популяции цианобактерий, динамичностью водных масс и другими факторами. К примеру, показано в одном из водохранилищ Болгарии [17], что размеры колоний *M. aeruginosa* в течение сезона варьируют в широких пределах (длина 40-1300 мкм, ширина 30-1070 мкм). В начальной стадии развития *M. aeruginosa* в планктоне присутствовало много колоний, размеры которых

находились в пределах, доступных для потребления многими видами зоопланктеров. По мере старения популяции размеры колоний заметно увеличиваются и превышают максимально допустимые размеры пищевых частиц.

При интенсивном цветении воды *Aphanizomenon flos-aquae* озера Глубокое размеры трихом колебались от 10 до 200 мкм и более, однако около 50% колоний имели размеры 10-125 мкм и более (8% - 10-50 мкм и 26% 50-100 мкм) [18].

В исследованном нами пруду большая часть цианобактерий (70%) *Anabaena spiroides* приходилась на «непоедаемую» фракцию (размер >100 мкм). Поедаемые фракции размерами <50 мкм и 50-100 мкм составляли 8 и 22% общей биомассы *A. spiroides*. Так что в природных водоемах только небольшая часть цианобактерий имеет «съедобные» для зоопланктона размеры.

В экспериментальной экосистеме наблюдалась иная картина. Доля нитей *A. spiroides* размерами <50 мкм и 50-100 мкм за один час возросла с 2 до 42% и с 21 до 58%, соответственно. Их биомасса увеличилась в 11 и 2 раза. Наоборот, доля биомассы нитей размерами >100 мкм снизилась с 77% до нулевых значений. А биомасса снизилась с 6.5 мг/л до нуля. Это произошло за счет разрушения (дробления) нитей *A. spiroides* дафниями в экспериментальной экосистеме. Биомасса колоний размером >100 мкм перешла в более мелкие размерные фракции, потребляемые *D. magna*.

За счет механического воздействия *D. magna* (при движении и биении плавательных антенн), а также потока воды в экспериментальной экосистеме происходит дробление крупных нитей *A. spiroides*. В результате улучшается кормовая база экосистемы. Однако этот процесс возможен лишь при высокой численности зоопланктона, когда создается, так называемая «толчея» ракообразных [19, 20].

В другом эксперименте, отделение ихтиофауны от планктонного сообщества способствовало нарастанию биомассы другого представителя фильтрующего зоопланктона *Simocephalus vetulus* за счет поступления фитопланктона с водными массами из водоема. Молодь *S. vetulus* из водоема через сетку размером 0.5 мм проникала в экспериментальную экосистему, где продолжала развиваться.

На основе анализа размерной структуры фито- и зоопланктона установлено, что *S. vetulus* хорошо приспособлен к условиям жизни в проточной экосистеме при цветении цианобактерий *M. aeruginosa* в отсутствие пищевого пресса ихтиофауны. Это проявляется в увеличении размеров, численности и биомассы *S. vetulus*, в отличие от водоема при пищевом прессе рыб-планктофагов.

Показано, что особи *S. vetulus* снижают биомассу *M. aeruginosa* в течение всего периода его роста (т.е., в начальной стадии, в период максимального цветения и в фазе завершения

развития). За счет дробления колоний цианобактерий особями *S. vetulus* происходит разрушение крупных фракций размером > 100 мкм. *S. vetulus* «создают» для себя приемлемую фракцию для дальнейшего использования.

В период завершения цветения *M. aeruginosa* и при дефиците минерального фосфора происходит снижение на порядок концентрации хлорофилла «а» при одновременном увеличении продуктов его распада – феофитина. Это сопровождается старением колоний и их дроблением. Крупные фракции переходили в группу более мелких, которые в дальнейшем потреблялись *S. vetulus*. В это время в больших количествах появлялись одиночные клетки *M. aeruginosa*.

Таким образом, особи *S. vetulus* за счет дробления более крупных фракций *M. aeruginosa* и их потребления освобождают экосистему от цианобактерий. В результате происходит очищение водоема и улучшение качества воды [21-25].

Заключение и выводы

При низкой численности роль мелкого фильтрующего зоопланктона в подавлении цветения была ничтожно мала. Мелкие виды и низкая их биомасса не позволяла им эффективно влиять на развитие цианобактерий. Наличие в водоеме достаточного количества биогенных элементов приводит к интенсивному цветению цианобактерий и снижению прозрачности воды.

Изолирование рыб в экспериментальной экосистеме с помощи сетки привело к перестройке сообщества, начали развиваться крупные виды зоопланктона, которые оказывали воздействие на развитие водорослей.

В экспериментальной установке изоляция рыб способствовала развитию крупных видов зоопланктона (*Daphnia magna* и *Simocephalus vetulus*). Численность дафний достигла 4600 экз./л. В экспериментальной экосистеме при отсутствии рыб биомасса растительного зоопланктона была в 3 тыс. раз больше таковой в водоеме. *D. magna* в экосистеме обладала высокой плодовитостью, ее размерный состав в основном состоял из особей размером 2-3 мм. Количество эфиппийальных самок было небольшим, что указывает на сносные условия среды.

Размерная структура дафний в течение исследованного периода сильно менялась. Средний размер особей варьировал от 1.5 до 2.4 мм (максимальный размер дафний достигал 3.6 мм). В составе популяции постоянно присутствовали ювенальные и размножающиеся особи. Эфиппийальные самки в августе, во время цветения цианобактерий, зарегистрированы не были, что указывает на благоприятные условия среды для развития *D. magna*. Необходимо отметить, *D. magna* в самом пруду отмечена не была.

В экспериментальной установке во второй половине лета начал развиваться другой крупный вид – *Simocephalus vetulus*. Ювенальные особи из водоема проникали в установку и наращивали высокую численность и биомассу. Размер особей достигал 1.9–2.1 мм. Численность ракообразных увеличивалась до 250–480 экз./л. Биомасса *S. vetulus* в экспериментальной установке была в 320 раз выше, чем биомассы растительного зоопланктона пруда.

Кормовая база *S. vetulus* и *D. magna* увеличивалась за счет разрушения (дробления) крупных колоний цианобактерий и перевода их в более мелкие фракции, потребляемые этими ракообразными. Фильтраторы «создавали» для себя приемлемую размерную фракцию для дальнейшего потребления. Это способствовало увеличению кормовой базы экосистемы.

Таким образом, удаление ихтиофауны из экосистемы способствовало развитию крупных видов зоопланктона. Они могли дробить колонии *M. aeruginosa* и использовать их в пищу.

Высокая численность, плодовитость и широкий размерный спектр особей *S. vetulus* и *D. magna* указывают на их способность создавать высокие численности и выполнять функцию природного фильтра, очищать воду от цианобактерий и повышать ее качество.

Работа выполнена в рамках темы № FMWZ-2022-0002 Государственного задания Института водных проблем РАН, а также в рамках междисциплинарной научно-образовательной школы Московского университета «Будущее планеты и глобальные изменения окружающей среды».

Список литературы

1. Петипа Т.С. Трофодинамика копепод в морских планктонных сообществах. Закономерности потребления и превращения вещества и энергии у особи. // Киев, Наукова Думка, 1981. – 243 с.
2. Иванова М.Б. Продукция планктонных ракообразных в пресных водах. // Л. ЗИН АН СССР, 1985. – 222 с.
3. Суценья Л.М. Количественные закономерности питания ракообразных. // Минск, Наука и Техника, 1975. – 208 с.
4. Заика В.Е. Удельная продукция водных беспозвоночных. // Киев, Наукова Думка, 1972. – 143 с.
5. Гиляров А.М. Динамика численности пресноводных планктонных ракообразных. // М. Наука, 1987. – 191 с.

6. Винберг Г.Г., Печень Г.А., Шушкина Э.А. Продукция планктонных ракообразных в трех озерах разного типа. // Зоол. журн., 1965, т. 14, № 5. С. 676-687.
7. Винберг Г.Г. Особенности водных экосистем. //Журн. Общей биологии, 1967, т. 28, № 5. С. 538-545.
8. Садчиков А.П. Значение и роль зоопланктона в трансформации органического вещества. 1. Трофические взаимоотношения в планктонном сообществе (обзор). // Биол. науки, 1993, № 3-4. – С. 5-23.
9. Гутельмахер Б.Л., Садчиков А.П., Филиппова Т.Г. Питание зоопланктона // Итоги науки и техники. ВИНТИ. Сер. Общая экология. Биоценология. Гидробиология, 1988. Т. 6. – 155 с.
10. Садчиков А.П. Гидробиология: планктон (Трофические и метаболические взаимоотношения) – М.: Изд-во ООО «ПКЦ Альтекс», 2013. – 240 с.
11. Садчиков А.П. Методы изучения пресноводного фитопланктона: методическое руководство. М.: Изд-во «Университет и Школа», 2003. 157с.
12. Герасимова Т.Н., Погожев П.И., Садчиков А.П. Подавление цветения цианобактерий зоопланктоном: эксперименты в природных водоемах // Экологическая химия. 2019. 28(5). С. 258–263.
13. Герасимова Т.Н., Погожев П.И., Садчиков А.П. Развитие зоопланктона в экспериментальной экосистеме // Экология промышленного производства. 2019. №3. С 55–58.
14. Gerasimova T.N., Pogozhev P.I., Sadchikov A.P. Suppression of Cyanobacterial Blooms by Zooplankton: Experiments in Natural Water Bodies with the Use of Flow-Through Ecosystems // Journal Russian Journal of General Chemistry. 2019. V.89 (13). P. 2840-2844.
15. Герасимова Т.Н., Погожев П.И., Садчиков А.П. Подавление цветения «цианобактерий» фильтрующим зоопланктоном // Вода: химия и экология. 2019. № 7–9. С. 67–71.
16. Герасимова Т.Н., Погожев П.И., Садчиков А.П. Борьба с эвтрофированием водоемов: роль в этом процессе фильтрующего зоопланктона // Водоочистка. Водоподготовка. Водоснабжение. 2020. № 12. С. 18-22.
17. Найденов В., Сайс Д. Влияние на планктона от язовир «Розов Кладенц» върху филтрационната ефективност на някои микросита. // Хидробиология, 1977, № 5. С 38-51.
18. Гутельмахер Б.Л. Особенности функционирования планктонного сообщества озера Глубокого. // В книге «Гидробиологические особенности самоочищения вод». //Л. ЗИН АН СССР, 1976. – С. 69-78.
19. Герасимова Т.Н., Погожев П.И., Садчиков А.П. Подавление цветения фитопланктона водоемов фильтрующим зоопланктоном в проточных экосистемах // Вод. ресурсы. 2020. Т.47. №2. С.144–150.
20. Gerasimova T.N., Pogozhev P.I., Sadchikov A.P. Suppression of Phytoplankton Blooming in Water Bodies with the Use of Filtering Zooplankton in Flow-Through Ecosystems //Water Resources. 2020. Vol. 47. No 2, pp. 231–237.
21. Герасимова Т.Н., Погожев П.И., Садчиков А.П. Борьба с цианобактериями использованием зоопланктона в экспериментальной экосистеме // Экологические системы и приборы. 2020. № 6. С.49–55.

22. Герасимова Т.Н., Погожев П.И., Садчиков А.П. Подавление цветения водорослей фильтраторами зоопланктона в небольших водоемах // Вод. ресурсы. 2018. Т.45. №2. С.164–170.
23. Gerasimova T.N., Pogozhev P.I., Sadchikov A.P. Suppression of Alga Blooming by Zooplankton Filter Feeders in Small Water Bodies // Water Resources. 2018. Vol.45. No 2, pp. 194–204.
24. Герасимова Т.Н., Погожев П.И., Садчиков А.П. Изменение структуры зоопланктона в экспериментальной установке при изоляции рыб-планктофагов // Экологическая химия. 2020. Т.29. № 5. С.283–290.
25. Герасимова Т.Н., Погожев П.И., Садчиков А.П. Влияние зоопланктона на развитие водорослей и цианобактерий в экспериментальной экосистеме // Экология промышленного производства. 2020. № 1.(109). С.43–48.

Вклад Московского общества испытателей природы в развитие научной и преподавательской деятельности в МГУ

Садчиков А.П.^{1,2,3}, Козлов О.В.⁴, Остроумов С.А.², Капков В.И.¹

¹ *Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова,
Международный учебно-научный биотехнологический центр, г. Москва, Россия*

² *Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова,
биологический факультет, г. Москва, Россия*

³ *Московское общество испытателей природы, г. Москва, Россия*

⁴ *Курганский государственный университет, г. Курган, Россия*

Ключевые слова: МОИП, МГУ, развитие науки, развитие образования, члены МОИП, история науки

Члены МОИП внесли существенный вклад в развитие научной и преподавательской деятельности в Московском Университете. Некоторые примеры могут быть приведены в этой связи.

Академик В.И. Вернадский

Владимир Иванович Вернадский — член Московского общества испытателей природы с 1890 г., почётный член с 1911 года, вице-президент с 1934 года.

Владимир Иванович работал в Московском университете в период 1890 - 1911 гг. Вернадский - экстраординарный (1898—1902), затем ординарный (1902—1911) профессор Императорского Московского университета. Автор курсов лекций и учебников по минералогии, кристаллографии и истории естествознания. Он воспитал плеяду учеников, многие из которых работали в Московском университете и других университетах России. Так, за время работы в Московском университете В.И. Вернадский воспитал более двадцати учеников, ставших известными минералогами (С.П. Попов, В.Г. Орловский, И.Ф. Сиома, Н.А. Скрицкий, Я.В. Самойлов, П.П. Пилипенко, В.В. Карандеев, Л.Л. Иванов, Н.И. Сургунов, А.А. Ауновский, А.О. Шкляревский, Н.Н. Тихонович, Б.А. Лури, В.Н. Мамонтов, П.К. Алексат, Г.И. Касперович, В.В. Аршинов, А.Е. Ферсман, В.С. Гулевич, Л.В. Яковлев). Ученики Вернадского заняли руководящие должности на кафедрах минералогии и геологии в Московском, Саратовском, Томском, Тбилиском, Таврическом, Воронежском университетах, в Киевском политехническом, Екатеринославском горном, Московском геологоразведочном институтах, Новоалександрійском институте сельского хозяйства, Московском сельскохозяйственном

институте, Московской горной академии, Университете им. Шанявского в Москве, Высших женских курсах в Москве и Санкт-Петербурге. Кроме того, возглавляли такие известные учреждения, как Минералогический музей Академии наук, Институт прикладной минералогии, Научный институт по удобрениям; работали в Комиссии по изучению производительных сил России, Биохимической лаборатории, Радиевом институте.

В.И. Вернадский внес большой вклад в развитие учения о биосфере, в науки о Земле. Идеи Вернадского оказались востребованными при развитии МГУ и в 21 столетии при создании в МГУ нового факультета глобальных процессов. Бюсты В.И. Вернадского установлены на химическом факультете и факультете глобальных процессов. Среди многих важных для науки публикаций В.И. Вернадского нельзя не отметить следующие: книги «Биосфера» и «Химическое строение биосферы Земли и ее окружения».

Академик С.А. Зернов

Академик Сергей Алексеевич Зернов был создателем секции МОИП, которая сейчас называется секция гидробиологии и ихтиологии. В 1922 г. С.А. Зернов создал первое в России гидробиологическое общество («Общество исследователей воды и его обитателей», с 1922 по 1932 гг.), которое было восстановлено как секция гидробиологии МОИП в 1947 году.

Первый учебник-монография «Общая гидробиология» (1934 г.) написан С.А. Зерновым.

Зернов был основателем кафедры гидробиологии биологического факультета МГУ. Он читал лекции в МГУ в период с 1924 по 1930 гг.

Под его редакцией опубликовано 50 выпусков «Фауны СССР», «Животный мир СССР», «Жизнь пресных вод», «Труды Зоологического института». Зернов С.А. был ответственным редактором «Зоологического журнала». С.А. Зернов – был членом Президиума международной ассоциации теоретической и прикладной лимнологии (Международное общество лимнологов).

Среди его публикаций можно отметить следующие: книги «Общая гидробиология», «Коренные и пришлые элементы фауны СССР и прилегающих морей» и многие другие.

Академик В.Н. Сукачев

Академик Сукачев Владимир Николаевич (1880-1967 гг.), президент МОИП в 1955-1967 гг., основоположник новой экологической науки, биогеоценологии.

Академик В.Н. Сукачев внес крупный вклад в развитие концептуального аппарата экологии, биологии и наук о Земле, предложив новую концепцию и термин «биогеоценоз». Эта концепция существенно дополнила фундаментальное понятие «экосистема», которое является одним из основных в современной экологии.

В.Н. Сукачев работал в МГУ в 1946-1953 гг., создал и читал новые лекционные курсы, был заведующим кафедрой биогеографии на географическом факультете МГУ. Активно работал на благо развития науки и образования в Московском университете.

Академик В.А. Садовничий

Виктор Антонович является президентом МОИП (с 2000 г.) и ректором МГУ. Он читает лекционные курсы на механико-математическом факультете МГУ, где заведует кафедрой. Им написаны научные монографии и учебники, - более 210 книг, а также более 800 статей. При его активном участии в МГУ были созданы новые факультеты и кафедры.

Виктор Антонович – автор двух официально признанных научных открытий.

В.А. Садовничий - Почётный член Российской академии образования, член Попечительского совета РАО. Член-корреспондент Российской академии наук с 1994 года, действительный член РАН с 1997 года, входит в состав Президиума РАН, с 2008 года по 2013 год — вице-президент РАН. Удостоен звания почётного доктора многих университетов мира. Возглавляет Российский Союз ректоров. С 1989 года являлся членом Совета Ассоциации университетов СССР (после преобразования в 1992 году — Евразийская ассоциация университетов), с 1992 года — возглавил Ассоциацию.

Входит в редакционные коллегии научных журналов «Проблемный анализ и государственно управленческое проектирование», «Квантовые компьютеры и квантовые вычисления» (главный редактор), «Высшее образование в России», «Фундаментальная и прикладная математика» и других. Под научным руководством В.А. Садовничего подготовлено более 65 кандидатских и 15 докторских диссертаций (в том числе учёных из других стран).

В.А. Садовничий - лауреат Государственной премии СССР (1989), Государственной премии Российской Федерации (2002) и трёх премий Правительства Российской Федерации (2006, 2011, 2012). Полный кавалер ордена «За заслуги перед Отечеством». Герой Труда Российской Федерации (2024).

Профессор И.В. Ильин

Илья Вячеславович Ильин – доктор политических наук, профессор, заведующий кафедрой глобалистики факультета глобальных процессов (ФГП) МГУ. Возглавил факультет в 2007 году.

И.В. Ильин - первый вице-президент МОИП, декан и создатель факультета глобальных процессов МГУ. И.В. Ильин – автор и соавтор более 60 книг и более 250 статей. По его инициативе и при активном участии организованы и проведены многие общероссийские и международные форумы, в том числе несколько международных научных конгрессов по глобалистике. Сейчас при активном участии И.В. Ильина ведется работа по совершенствованию структуры и функционирования МОИП.

Выше приведены только некоторые из примеров существенной и активной роли членов МОИП в развитие научной и преподавательской деятельности в МГУ. Ценную работу в этой области проводит большое число членов МОИП, которые работают в МГУ. Можно прогнозировать, что эта полезная и незаменимая работа будет предметом многих новых публикаций в будущем.

Библиография

Вернадский В.И. Биосфера. - Ленинград: Научное химико-техническое издательство, Научно-технический отдел В. С. Н. Х., 1926. -146 с.

Вернадский В.И. Собрание сочинений: в 24 т / Под ред. Э. М. Галимова. — М.: Наука, 2013. — ISBN 978-5-02-038093-6.

Вернадский В.И. Химическое строение биосферы Земли и ее окружения. – М.: Наука, 1965. – 374 с.

Зернов С.А. «Общая гидробиология», – Москва; Ленинград: Государственное издательство биологической и медицинской литературы, 1934. – 508 с.

Зернов С.А. Коренные и пришлые элементы фауны СССР и прилегающих морей. - М.—Л., 1938.

Зернов С.А. О пределах жизни при отрицательных температурах в незамерзающей воде в природных условиях // Доклады Акад. наук СССР. – 1944. – Т. 44. - № 2.

Сукачёв В.Н. Биогеоценология и фитоценология // Докл. АН СССР. 1945. Т. 47, № 6. С. 447—449.

Сукачёв В.Н. Биогеоценоз как выражение взаимодействия живой и неживой природы на поверхности Земли: соотношение понятий «биогеоценоз», «экосистема», «географический ландшафт»

и «фация» // Основы лесной биогеоценологии / под ред. В. Н. Сукачёва, Н. В. Дылиса. М.: Наука, 1964. С. 5—49.

Садовничий В.А. Теория операторов. — 4-е, испр. и доп. — М.: Дрофа, 2002.

Садовничий В.А. Избранные труды. Математика, механика и их приложения. В трёх томах. — М.: Издательство МГУ, 2009. — ISBN 978-5-211-05682-4.

Садовничий В.А., Акаев А.А., Ильин И.В. и др. Преодолевая пределы роста. Доклад Римскому клубу / под ред. В.А. Садовниченко /— Издательство Московского университета Москва, 2024. — 553 с.

Ильин И.В. Основы глобалистики. — М.: Изд-во МГУ, 2021. — 303 с.

Ильин И.В., Алексеев А.С., Алексеенко О.А. и др. Сокровища Библиотеки Московского общества испытателей природы — М.: Изд-во МГУ, 2023. — 135 с.

Остроумов С.А. В.И. Вернадский и разработка фундаментальных концепций в теории биосферы. In: Biogeochemical innovations under the conditions of the biosphere technogenesis correction, Tiraspol. 2020, Vol.1, pp. 38-43. ISBN 978-9975-150-60-6. https://ibn.idsi.md/vizualizare_articol/114665